

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté de génie
Département de génie civil

VALORISATION DE PARTICULES FINES DANS LES BÉTONS COMPACTÉS AU ROULEAU ET LES BÉTONS MOULÉS À SEC

Mémoire de maîtrise
Spécialité : génie civil

Jean-Philippe FAUBERT

Jury : Arezki TAGNIT-HAMOU
Richard GAGNÉ
Ammar YAHIA
Benoit FOURNIER

RÉSUMÉ

L'utilisation des bétons secs représente de grands volumes de production au Québec. Pour des raisons techniques, économiques et environnementales, l'utilisation d'ajouts cimentaires dans ce type de béton est pratique courante. Le coût et la disponibilité de ces matériaux peuvent toutefois être un obstacle à leur utilisation. Ce projet vise donc à étudier la possibilité d'utiliser des matériaux alternatifs en remplacement partiel du ciment dans les bétons compactés au rouleau et les bétons moulés à sec. Les matériaux à l'étude sont : la poudre de verre, des poussières de pierre calcaire et des poussières de béton concassé.

Les bétons compactés au rouleau fabriqués en laboratoire sont représentatifs des mélanges typiques utilisés pour la fabrication de pavages. En fonction de leur maniabilité, ces bétons se divisent en deux catégories distinctes : les bétons compactés au rouleau (BCR) et les bétons compactés à la paveuse (BCP). Les essais réalisés sur ces bétons permettent d'évaluer l'influence de la poudre de verre et des poussières de concassage sur la maniabilité du béton frais, la résistance à la compression, la résistance à la flexion et la pénétration des ions chlore.

Les bétons moulés à sec fabriqués en laboratoire sont représentatifs des mélanges utilisés par l'industrie pour la fabrication de pavés. Les essais réalisés sur ces bétons permettent d'évaluer l'influence de la poudre de verre et des poussières de concassage sur la maniabilité du béton frais, l'absorption, la masse volumique, la résistance à la compression et la résistance à la traction.

Des blocs de maçonnerie et des pavés ont été fabriqués en usine pour évaluer le potentiel d'utilisation de la poudre de verre en remplacement cimentaire. La masse volumique, l'absorption et la résistance à la compression ont été mesurées en laboratoire sur ces éléments. La résistance à l'écaillage a été mesurée sur les pavés.

Mots-clés : béton compacté au rouleau, béton moulé à sec, poudre de verre, pavés, poussières de béton recyclé, poussières de pierre calcaire, presse à cisaillement giratoire, temps Vebe.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tout particulièrement mon directeur Arezki Tagnit-Hamou et mon codirecteur Richard Gagné pour leur confiance, leur présence et leur support tout au long de mes travaux de maîtrise. Leurs judicieux conseils ont toujours été d'une grande valeur du point de vue professionnel, technique et humain. Travailler dans leur équipe a été une expérience des plus enrichissantes à tout point de vue.

Ce projet n'aurait pu avoir lieu sans la précieuse aide du personnel technique du groupe béton de l'Université Sherbrooke. Merci à Denis Bolduc, Claude Faucher, Ghislaine Luc, Sylvain Roy et Rajko Vojnovic pour leur participation et la générosité de leur temps.

Je tiens également à remercier le Fonds de recherche du Québec – Nature et technologies pour son aide financière au qui a permis la réalisation de ce projet de recherche, le Groupe Permacon et son équipe pour leur aide technique et matérielle, le Groupe Bauval inc. et la Carrière Acton Vale ltée pour les matériaux.

Finalement, un merci spécial à ma famille et à tous mes amis pour leur présence, leurs encouragements et leur amour.

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION	1
2. ÉTAT DE L'ART	3
2.1 Les bétons secs	3
2.2 Les bétons compactés au rouleau	3
2.2.2 BCR vs BCP	5
2.2.3 Formulation des BCR	5
2.2.4 Les liants	8
2.3 Les bétons moulés à sec	10
2.3.1 Le rapport E/C	10
2.3.2 Les liants	11
2.3.3 Le réseau de bulles d'air	13
2.3.4 Le malaxage et la mise en place	14
2.3.5 Mesure de la maniabilité	15
2.3.6 La cure	16
2.4 Poussières de pierre calcaire	16
2.4.1 Provenance et production	16
2.4.2 Utilisation	16
2.5 Poussières de béton concassé	16
2.5.1 Provenance et production	16
2.5.2 Utilisation	17
2.6 Utilisation du verre dans le béton	17
2.6.1 Recyclage du verre	17
2.6.2 Avantages de l'utilisation du verre dans le béton	18
2.6.3 Activité pouzzolanique du verre	19
3. OBJECTIFS DU PROJET ET MÉTHODOLOGIE	25
3.1 Objectifs du projet de recherche	25
3.2 Méthodologie	26
3.2.1 BCR et BCP	26
3.2.2 Bétons moulés à sec en usine	28
3.2.3 Bétons moulés à sec en laboratoire	30
4. MATÉRIAUX	32
4.1 Ciment	32

4.1.1	Ciment dans les bétons compactés au rouleau.....	32
4.1.2	Ciment dans les bétons moulés à sec.....	32
4.2	Poudre de verre.....	33
4.3	Poussières de concassage	35
4.4	Matériaux granulaires	38
4.4.1	Agrégats dans les bétons compactés au rouleau.....	38
4.4.2	Granulats dans les bétons moulés à sec	39
4.5	Adjuvants.....	40
4.5.1	Réducteur d'eau.....	40
4.5.2	Agent entraîneur d'air.....	40
4.5.3	Contrôleur d'efflorescence	40
5.	FORMULATION DES MÉLANGES DE BÉTON	41
5.1	Bétons compactés au rouleau et bétons compactés à la paveuse.....	41
5.1.1	Optimisation granulaire	41
5.1.2	Détermination du volume de pâte.....	41
5.1.3	Remplacement cimentaire	42
5.1.4	Nomenclature et composition des mélanges	43
5.2	Bétons moulés à sec en usine	45
5.2.1	Blocs de maçonnerie.....	45
5.2.2	Pavés.....	45
5.3	Bétons moulés à sec en laboratoire	46
5.3.1	Optimisation granulaire	46
5.3.2	Composition des mélanges avec poudre de verre.....	46
5.3.3	Composition des mélanges avec poussières de concassage	47
6.	PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES.....	48
6.1	Malaxage	48
6.1.1	BCR et BCP.....	48
6.1.2	Bétons moulés à sec.....	48
6.2	Essais réalisés sur les BCR et BCP	50
6.2.1	Mesure de la maniabilité (temps Vebe).....	50
6.2.2	Masse volumique et teneur en air	50
6.2.3	Cure des échantillons.....	51
6.2.4	Résistance à la compression	51
6.2.5	Résistance à la flexion	53

6.2.6 Pénétration des ions chlore	53
6.3 Essais réalisés sur les éléments en bétons moulés à sec en usine	54
6.3.1 Cure des blocs de maçonnerie	54
6.3.2 Absorption et masse volumique des blocs de maçonnerie	54
6.3.3 Résistance à la compression des blocs de maçonnerie	55
6.3.4 Cure des pavés	57
6.3.5 Absorption et masse volumique des pavés	57
6.3.6 Résistance à la compression des pavés	57
6.3.7 Résistance à l'écaillage des pavés	57
6.4 Essais réalisés sur les bétons moulés à sec en laboratoire	58
6.4.1 Fabrication des échantillons	58
6.4.2 Cure des échantillons	60
6.4.3 Masse volumique et absorption	61
6.4.4 Résistance à la compression	61
6.4.5 Résistance à la traction par fendage	61
7. PRÉSENTATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS	62
7.1 BCR et BCP	62
7.1.1 Masse volumique et teneur en air	62
7.1.2 Mesure de la maniabilité (temps Vebe)	64
7.1.3 Résistance à la compression	67
7.1.4 Résistance à la flexion	73
7.1.5 Pénétration des ions chlore	77
7.2 Bétons moulés à sec en usine	80
7.2.1 Blocs de maçonnerie	80
7.2.2 Pavés	82
7.3 Bétons moulés à sec au laboratoire	87
7.3.1 Maniabilité	87
7.3.2 Masse volumique et absorption	92
7.3.3 Résistance à la compression	96
7.3.4 Résistance à la traction	99
8. CONCLUSION	103

LISTE DES RÉFÉRENCES.....	107
Annexe A.....	A-1
Annexe B.....	B-1
Annexe C.....	C-1
Annexe D.....	D-1
Annexe E.....	E-1
Annexe F.....	F-1
Annexe G.....	G-1
Annexe H.....	H-1
Annexe I.....	I-1

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 – Mise en place du BCR	4
Figure 2.2 – Représentation schématique du procédé de compaction d'un ICT	15
Figure 2.3 – Les trois sphères du développement durable	18
Figure 3.1 – Programme expérimental des BCR et BCP	27
Figure 3.2 – Blocs de maçonnerie (dimensions en mm)	28
Figure 3.3 – Programme expérimental des bétons moulés à sec en usine	29
Figure 3.4 – Programme expérimental des bétons moulés à sec en laboratoire	31
Figure 4.1 – Granulométrie cumulée de la poudre de verre	33
Figure 4.2 – DRX de la poudre de verre	34
Figure 4.3 – Courbes granulométriques des poussières de concassage	35
Figure 4.4 – DRX des poussières de pierre calcaire	37
Figure 4.5 – DRX des poussières de béton recyclé	37
Figure 4.6 – Courbes granulométriques des granulats pour BCR	38
Figure 4.7 – Courbe granulométrique des granulats dans les bétons moulés à sec	39
Figure 5.1 – Optimisation granulaire des mélanges de BCR et de BCP	41
Figure 5.2 – Relation entre le volume de pâte et le temps Vebe	42
Figure 5.3 – Courbe granulométrique des bétons moulés à sec en laboratoire	46
Figure 6.1 – Malaxeur à cuve rotative de 100 litres	49
Figure 6.2 – Malaxeur à cuve rotative de 10 litres	49
Figure 6.3 – Appareil Vebe	50
Figure 6.4 – Moule de 150 x 300 mm, cylindre en acier et marteau de type Kango	52
Figure 6.5 – Appareil à cisaillement giratoire (ICT-100R)	58
Figure 6.6 – Cinétique de compaction de l'ICT	59
Figure 7.1 – Maniabilité des BCR et des BCP avec poudre de verre	65
Figure 7.2 – Maniabilité des BCR et BCP avec poussières de pierre calcaire	66
Figure 7.3 – Maniabilité des BCR et BCP avec poussières de béton concassé	67
Figure 7.4 – Résistance à la compression des BCR et BCP avec PV	70
Figure 7.5 – Résistance à la compression des BCR et BCP avec PPC	71
Figure 7.6 – Résistance à la compression des BCR et BCP avec PBC	72
Figure 7.7 – Résistance à la flexion des BCR et BCP avec PV	74
Figure 7.8 – Résistance à la flexion des BCR et BCP avec PPC	75
Figure 7.9 – Résistance à la flexion des BCR et BCP avec PBC	76

Figure 7.10 – Pénétration des ions chlore dans les BCP	79
Figure 7.11 – Masse volumique et absorption des blocs de maçonnerie à 28 jours.....	80
Figure 7.12 – Résistance à la compression des blocs de maçonnerie.....	82
Figure 7.13 – Masse volumique et absorption des pavés à 28 jours	83
Figure 7.14 – Résistance à la compression des pavés	84
Figure 7.15 – Résistance à l'écaillage des pavés.....	85
Figure 7.16 – Dynamique de compaction du mélange de référence	87
Figure 7.17 – Masse volumique et cisaillement en fonction du temps.....	88
Figure 7.18 – Masse volumique et cisaillement des mélanges de référence	89
Figure 7.19 – Masse volumique et absorption des mélanges avec PV à 28 jours	93
Figure 7.20 – Masse volumique et absorption des mélanges avec PPC à 28 jours	94
Figure 7.21 – Masse volumique et absorption des mélanges avec PBC à 28 jours.....	95
Figure 7.22 – Résistance à la compression des mélanges avec PV	97
Figure 7.23 – Résistance à la compression des mélanges avec PPC	98
Figure 7.24 – Résistance à la compression des mélanges avec PBC	99
Figure 7.25 – Résistance à la traction des mélanges avec PV	100
Figure 7.26 – Résistance à la traction des mélanges avec PPC	101
Figure 7.27 – Résistance à la traction des mélanges avec PBC	102

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4.1 – Propriétés chimiques et physiques du ciment GU, GUb-SF et GUb-S	32
Tableau 4.2 – Caractéristiques de la poudre de verre.....	33
Tableau 4.3 – Caractéristiques chimiques des poussières de concassage	36
Tableau 4.4 – Caractéristiques physiques des poussières de concassage.....	36
Tableau 4.5 – Caractéristiques physiques des granulats pour BCR	38
Tableau 4.6 – Caractéristiques physiques des granulats pour bétons moulés à sec	39
Tableau 5.1 – Composition des BCR et BCP avec poudre de verre (PV).....	44
Tableau 5.2 – Composition des BCR et BCP avec poussières de pierre calcaire (PPC).....	44
Tableau 5.3 – Composition des BCR et BCP avec poussières de béton concassé (PBC).....	44
Tableau 5.4 – Composition des blocs de maçonnerie	45
Tableau 5.5 – Composition des pavés	45
Tableau 5.6 – Composition des mélanges avec poudre de verre.....	47
Tableau 5.7 – Composition des mélanges avec poussières de pierre calcaire.....	47
Tableau 5.8 – Composition des mélanges avec poussières de béton recyclé	47
Tableau 6.1 – Pénétration des ions chlore	54
Tableau 7.1 – Propriétés à l'état frais des BCR et BCP avec PV.....	62
Tableau 7.2 – Propriétés à l'état frais des BCR et BCP avec PPC.....	63
Tableau 7.3 – Propriétés à l'état frais des BCR et BCP avec PBC	63
Tableau 7.4 – Maniabilité des mélanges avec fumée de silice	90
Tableau 7.5 – Maniabilité des mélanges avec poudre de verre	91
Tableau 7.6 – Maniabilité des mélanges avec poussières de pierre calcaire.....	91
Tableau 7.7 – Maniabilité des mélanges avec poussières de béton concassé	92

1. INTRODUCTION

Le développement durable est un sujet d'actualité qui touche de près ou de loin tous les secteurs économiques. La mise en marché d'un produit ayant un impact minimal sur l'environnement et qui demeure compétitif économiquement est un défi de taille pour les concepteurs et les producteurs québécois. L'industrie du ciment et du béton ne fait pas exception à la règle. Les efforts mis de l'avant dans les dernières années démontrent bien la volonté de ce secteur d'activité à innover et de mettre de l'avant des procédés ayant un impact minimal sur l'environnement. Malgré tout, l'industrie canadienne du ciment est responsable d'environ 1,4 % de toutes les émissions de gaz à effet de serre au Canada et de 1 % des émissions de polluants atmosphériques [Association Canadienne du Ciment, 2010]. L'utilisation de produits recyclés lors de la fabrication du béton est une stratégie efficace qui permet de réduire l'empreinte environnementale de ce matériau largement utilisé.

Le présent projet de recherche vise à étudier différents ajouts cimentaires alternatifs provenant de matériaux recyclés ou de sous-produits industriels. L'utilisation de ces ajouts permettrait de réduire les impacts environnementaux causés par la production du béton de ciment et d'utiliser des matériaux peu valorisés. Les matériaux à l'étude sont de la poudre de verre mixte, des poussières de pierre calcaire concassée et des poussières de béton recyclé concassé. Ces ajouts cimentaires alternatifs sont incorporés dans les bétons compactés au rouleau (BCR), les bétons compactés à la paveuse (BCP) et dans les bétons moulés à sec.

La poudre de verre est obtenue à partir du broyage du verre recyclé mixte. Plusieurs milliers de tonnes de verre sont récupérés chaque année au Québec. Plus de la moitié du verre recyclé est de couleur mixte et n'a pas de valeur intéressante sur le marché du recyclage [Gagné, 2010]. Étant donné le grand volume disponible et son faible coût, l'utilisation du verre mixte dans le béton est une alternative particulièrement intéressante et prometteuse.

Les poussières de pierre calcaire proviennent des procédés de concassage de la pierre, lors de la production de granulats. Les poussières de béton concassé proviennent également des procédés de concassage, lors de la production de granulats recyclés à partir de bétons d'ouvrages d'art. Ces poussières représentent des volumes significatifs et ont peu ou pas d'application dans le domaine de la construction. L'incorporation de ces matériaux dans le

béton permettrait d'écouler les réserves inutilisées et de réduire l'utilisation de matériaux neufs.

Les bétons compactés au rouleau à l'étude dans ce projet sont représentatifs de ce qui est utilisé pour la construction de pavage lors de la construction de stationnements ou d'aires d'entreposage. Le choix d'étudier ce type de béton est justifié par ses grands volumes annuels de production. Plus de 200 000 m³ de BCR ont été produits au Québec entre 1994 et 2006 [BCR.cc, 2011]. Les bétons moulés à sec sont utilisés pour la préfabrication en usine de petits éléments, tels que des blocs de maçonnerie, des briques, des pavés, etc. La production en usine de ce type de béton représente également d'importants volumes.

Afin d'évaluer le potentiel d'utilisation des ajouts cimentaires alternatifs, le projet de recherche se divise en trois axes spécifiques qui portent respectivement sur l'étude des BCR et des BCP fabriqués en laboratoire, des bétons moulés à sec fabriqués en usine et des bétons moulés à sec fabriqués en laboratoire. Les objectifs spécifiques de ces trois axes sont les suivants :

- Mesurer la maniabilité, la résistance à la compression et la résistance à la flexion des BCR et des BCP contenant de la poudre de verre, des poussières de pierre calcaire et des poussières de béton concassé. Faire l'analyse qualitative de la microstructure des BCP avec poudre de verre à l'aide de l'essai de pénétration des ions chlore.
- Mesurer la masse volumique, l'absorption, la résistance à la compression et la durabilité à l'écaillage d'éléments en béton moulés à sec en usine contenant de la poudre de verre.
- Mesurer la masse volumique, l'absorption, la maniabilité, la résistance à la compression et la résistance à la traction des bétons moulés à sec fabriqués en laboratoire contenant de la poudre de verre, des poussières de pierre calcaire et des poussières de béton concassé.

2. ÉTAT DE L'ART

2.1 Les bétons secs

D'une manière générale, les bétons secs peuvent être définis comme des bétons qui ont une consistance initiale significativement plus élevée que celle des bétons conventionnels (bétons fluides). Contrairement à un béton conventionnel et à l'opposé d'un béton autoplaçant, un béton sec a un affaissement nul (ou de seulement quelques centimètres). Un mélange de béton sec doit être assez rigide pour permettre une consolidation efficace par les rouleaux compacteurs (dans le cas des BCR), ou permettre le démoulage immédiat (dans le cas d'éléments moulés à sec), mais assez humide pour permettre une distribution adéquate de la pâte dans la masse de l'élément durant les opérations de malaxage et de vibration. La consistance élevée de ces mélanges est normalement atteinte en réduisant la quantité d'eau ou en abaissant la fraction de pâte dans le mélange [Marchand *et al.*, 1996]. Pour permettre la mise en place d'un béton sec, une source d'énergie extérieure est nécessaire afin de rapprocher les particules du béton et de diminuer au maximum les vides à l'intérieur du mélange. La consolidation du béton est obtenue à l'aide de pressions et de vibrations et est essentielle pour permettre au béton d'obtenir de bonnes performances mécaniques, une finition adéquate et une durabilité appropriée.

2.2 Les bétons compactés au rouleau

Tout comme son utilisation et ses techniques de mise en place, la formulation des BCR diffère de celle des bétons usuels. En se basant sur un squelette granulaire de compacité maximale et sur un volume de pâte optimal, il est possible de produire des BCR pour pavage ayant des capacités mécaniques supérieures à celles d'un béton conventionnel [Vahedifard *et al.*, 2010]. Le béton compacté au rouleau a l'avantage de ne pas être armé, d'être économique, rapide et simple à mettre en place et ne requiert peu ou habituellement pas de coffrage. Il existe deux grandes catégories de béton compacté au rouleau : les BCR pour barrage et les BCR pour pavage. Les BCR pour barrage sont utilisés pour la construction de noyaux de barrages ou de digues. Les BCR pour pavage sont pour leur part utilisés sur des sites où la circulation est lente : stationnements, aire d'entreposage, de recyclage ou de compostage, etc. L'utilisation de

BCR pour pavage est tout à fait adéquate pour des sites où il y a une forte circulation de machinerie lourde. Le BCR offre un fini de surface de qualité et, au contraire de l'enrobé bitumineux, une excellente résistance à l'orniérage.

Le béton compacté au rouleau est habituellement fabriqué dans un malaxeur de type « pug mill ». Ce type de malaxeur permet d'obtenir une puissance de malaxage assez grande pour disperser uniformément la faible quantité d'eau dans tout le mélange de béton. L'usine de production a l'avantage d'être mobile, ce qui diminue les distances de transport entre l'usine et le chantier. Le béton est transporté jusqu'au site de mise en place à l'aide de camions conventionnels à benne. Le béton est ensuite mis en place à l'aide de paveuses utilisées pour la mise en place d'enrobés bitumineux. Des modifications mineures peuvent être requises sur l'appareil pour permettre la mise en place de couches plus épaisses et de plus grandes quantités de matériaux. Il est possible de poser le BCR en couches allant jusqu'à 300 mm d'épaisseur. Après avoir été étendu par la paveuse, le béton est consolidé à l'aide de rouleaux compactionnaires afin d'obtenir une compacité maximale (réduction des vides) et un fini de surface uniforme. La mise en place du BCR à l'aide d'une paveuse conventionnelle et de rouleaux compactionnaires est illustrée à la figure 2.1. Étant donné la faible teneur en eau des bétons compactés au rouleau, une cure appropriée est essentielle immédiatement après la mise en place pour éviter l'évaporation excessive de la surface du pavage. Plusieurs techniques de cure peuvent être utilisées, tel que l'utilisation de membranes, de toiles, de matelas de coton, de sable humide, de camion arroseur, etc. [American Concrete Institute, 1987].



Figure 2.1 – Mise en place du BCR
[BCR.cc, 2011]

2.2.2 BCR vs BCP

Il existe deux catégories distinctes de bétons compactés au rouleau pouvant être utilisés pour la fabrication de pavage : les bétons compactés au rouleau (BCR) et les bétons compactés à la paveuse (BCP). Ces deux types de béton se distinguent dans leur composition et dans leur méthode de mise en place. Les BCP ont une maniabilité supérieure (temps Vebe plus faible) à celle des BCR. Cette hausse de maniabilité peut être obtenue en augmentant le volume de pâte et/ou le rapport eau-liant. Au contraire des BCR, les BCP n'ont pas besoin de rouleau compacteur pour permettre leur consolidation. L'utilisation d'une paveuse spécialisée équipée d'une table d'une masse plus élevée induisant des vibrations plus efficaces permet d'obtenir la compaction voulue du béton sans avoir recours à des rouleaux. Des rouleaux compacteurs peuvent être utilisés pour la mise en place des BCP seulement pour permettre la finition de la surface du pavage.

2.2.3 Formulation des BCR

Il n'existe jusqu'à ce jour aucune méthode standard reconnue pour la formulation des BCR. Depuis plusieurs années, différentes méthodes ont été utilisées avec succès dans le monde entier pour la formulation de BCR pour barrage et de BCR pour pavage. La plupart de ces méthodes demeurent toutefois essentiellement empiriques et requièrent la réalisation de plusieurs gâchées d'essais pour obtenir les proportions optimales du mélange [Marchand *et al.*, 1997].

La formulation d'un BCR doit généralement se conformer à certains critères de performance. La teneur en liant doit être optimale afin d'atteindre les propriétés mécaniques spécifiées à un coût minimal et le rapport eau/liant du mélange doit être ajusté de manière à obtenir une maniabilité permettant d'atteindre une densité en place optimale avec le rouleau compacteur. La teneur en eau ne doit pas être trop élevée pour éviter que le passage du rouleau compacteur ne crée des ondulations dans le béton frais, mais assez élevée pour éviter la ségrégation du mélange. La teneur en eau optimale dépend des granulats (forme, absorption, granulométrie) et du type et de la quantité de liant utilisé. Les proportions entre les différentes classes granulaires doivent être fixées de façon à atteindre la densité requise et à produire une

surface fermée. En résumé, la formulation d'un mélange de BCR doit permettre l'obtention d'un béton le plus dense possible, pour une maniabilité optimale [Marchand *et al.*, 1997].

Les méthodes de formulation des BCR peuvent être classées en trois catégories distinctes : méthode empirique, méthode semi-empirique et méthode théorique.

Méthodes empiriques

Ces méthodes dites empiriques consistent, par méthode itérative, à trouver la formulation qui permet d'obtenir soit la maniabilité optimale, la combinaison granulats-liant la plus économique ou d'obtenir la densité maximale selon l'approche de la compaction des sols. Un désavantage majeur de la formulation des BCR selon une méthode empirique est le temps nécessaire à sa réalisation. Dans certain cas, jusqu'à 25 gâchées sont nécessaires en laboratoire pour obtenir la bonne formule de mélange. Des tests supplémentaires peuvent également être nécessaires en chantier pour ajuster la maniabilité du mélange. L'énergie de malaxage en usine peut être différente de celle en laboratoire et influencer la maniabilité du mélange [Marchand *et al.*, 1997].

Méthodes semi-empiriques

Une méthode semi-empirique est basée à la fois sur des données expérimentales et sur quelques formules empiriques. La méthode du « volume de pâte optimal » est un exemple de ce type de méthode. Cette méthode se base sur l'hypothèse que le BCR contient tout juste assez de pâte pour combler les vides intergranulaires lorsque le squelette granulaire a atteint sa compacité maximale. Si une quantité insuffisante de pâte est utilisée, les vides de compaction restant après la compaction peuvent réduire les résistances mécaniques du béton et augmenter la perméabilité. D'autre part, un excès de pâte augmente les coûts de production et la chaleur d'hydratation, sans améliorer significativement les performances du BCR [Marchand *et al.*, 1997].

La méthode du « volume des vides » comporte trois étapes :

1. Sélection du fuseau granulaire permettant de réduire au maximum le volume des vides.
Pour ce faire, on peut utiliser la formule modifiée de Fuller-Thompson (équation 2.1).

$$p = \left(\frac{d}{D}\right)^{0,45} \times 100 \quad \text{équation 2.1}$$

où :

d : dimension des tamis (mm)

D : diamètre maximal des granulats (mm)

p : pourcentage passant (%) des particules selon le tamis de dimension « d »

2. Le volume par mètre cube des vides est utilisé pour trouver le volume de pâte optimal pour remplir ces vides et obtenir la maniabilité désirée. Le volume de pâte nécessaire est obtenu à l'aide d'un abaque, selon la maniabilité désirée. On obtient ainsi un rapport V_p/V_{vc} . La masse de chaque constituant peut ensuite être obtenue à l'aide de l'équation (2.2).

$$V_p = V_{\text{eau}} + V_{\text{ciment}} + V_{\text{ajouts minéraux}} \quad \text{équation 2.2}$$

où :

V_p : volume de pâte dans 1 m³ de BCR (l/m³)

V_{vc} : volume des vides dans 1 m³ de granulat compacté (l/m³)

3. Choix du rapport E/C et de la proportion de ciment et d'ajouts cimentaires pour produire une pâte permettant de satisfaire aux exigences mécaniques. Cette étape nécessite également l'utilisation d'un abaque.

Cette méthode ne permet toutefois pas la formulation de BCR avec air entraîné. Des travaux réalisés à l'Université de Sherbrooke ont permis d'établir des relations entre la maniabilité et les résistances mécaniques du béton, en fonction de la teneur en air des BCR pour barrage et des BCR pour pavage. Le volume de pâte dans un BCR correspond au volume d'air, du ciment, des cendres volantes et d'eau. La maniabilité et les résistances d'un BCR est donc fonction du rapport $(V_p + \text{air})/V_{vc}$ [Houehanou, 2004].

L'utilisation d'une méthode semi-empirique exige également la réalisation de quelques gâchées d'essais au laboratoire pour valider la formule de mélange [Marchand *et al.*, 1997].

Méthodes théoriques

Les méthodes théoriques utilisent des formules mathématiques pour faire la formulation des BCR. Ces méthodes permettent de maximiser la compacité du squelette granulaire du mélange de béton en optimisant les proportions des différentes classes granulaires (sable, pierre, ciment, ajouts minéraux). Le « modèle d'empilement compressible » développé au

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées en France (LCPC) s'applique particulièrement bien à la formulation de mélanges de béton de ciment à compacité granulaire optimale [Gauthier et Marchand, 2002]. Plus spécifiquement, ce modèle est utilisé pour évaluer la compacité d'un arrangement de grains de différents diamètres d_i ($d_1 > d_2 \dots > d_n$) selon :

1. La compacité propre (α_i) de chaque classe granulaire (c'est à dire, la compacité d'un arrangement de grains de diamètre similaire).
2. La proportion massique (γ_i) de chaque classe de grains (exprimé en fonction du volume total des solides).

Dans la grande majorité des cas, lors de l'utilisation de cette méthode, une seule gâchée au laboratoire est nécessaire pour ajuster les proportions du mélange [Marchand *et al.*, 1997].

2.2.4 Les liants

Lorsque comparée avec des bétons ordinaires (bétons fluides), la pâte des bétons secs semble être beaucoup plus hétérogène. La dispersion de l'eau à l'intérieur de la pâte des bétons secs semble également plus irrégulière que dans la pâte des bétons ordinaires [Marchand *et al.*, 1996]. Marchand a observé que l'addition de fumée de silice et de cendres volantes de classe C permet d'améliorer significativement l'homogénéité de la pâte de ciment dans les mélanges de BCR. L'utilisation de ces ajouts minéraux semble permettre une meilleure distribution de la pâte de ciment, pour une même quantité d'eau.

Cao *et al.* (2000) ont également étudié l'effet de l'ajout de cendres volantes dans les BCR. Dans leurs travaux, différents mélanges ont été fabriqués avec l'ajout de 39 % à 72 % de cendres volantes, en substitution du ciment. Les résistances à la flexion de ces mélanges, par rapport au mélange de référence, sont plus faibles à jeune âge, mais dépassent celles de la référence à 28 jours et plus. À long terme, la pâte des BCR avec cendres volantes devient plus dense et plus homogène (réduction de la porosité). L'amélioration de ces propriétés est bénéfique à la résistance à la flexion du béton, qui est plus sensible aux caractéristiques de la structure interne que la résistance à la compression.

L'incorporation de cendres volantes par méthode de supersubstitution permet également d'améliorer la maniabilité (facilité de compactage) des BCR [Cao *et al.*, 2000].

L'ajout de grands volumes de cendres volantes dans les BCR permet au béton de résister à des cycles répétés de gel-dégel, et ce, sans la présence d'air entraîné [Pigeon et Malhotra, 1995].

Vahedifard *et al.* (2010) ont étudié l'effet de l'ajout de fumée de silice et de poussières de pierre ponce (finesse inférieure au ciment) sur les propriétés physiques des BCR. Les mélanges produits lors de cette étude ont deux teneurs différentes en liant (12 et 15 %). Pour chacune de ces teneurs, 10 et 30 % de la masse du ciment a été remplacée par des poussières de pierre ponce et 10 % de ciment a été remplacé par de la fumée de silice. Le remplacement du ciment par les poussières de pierre ponce a permis de réduire le temps Vebe (amélioration de la maniabilité). L'ajout de 10 % de fumée de silice a toutefois diminué légèrement la maniabilité du béton [Vahedifard *et al.*, 2010]. Cette baisse de maniabilité est normale, puisque les performances de la fumée de silice diminuent lorsqu'on dépasse un certain dosage. C'est pourquoi le taux de remplacement en fumée de silice est normalement limité à 10 % dans les BCR [Marchand *et al.*, 1997]. Les mélanges contenant 10 % de fumée de silice ont montré une augmentation significative de la résistance à la compression, tandis que les mélanges contenant des fines de pierre ponce ont montré une diminution de résistance en fonction du taux de remplacement du ciment. Les BCR contenant de la fumée de silice ou des poussières de pierre ponce résistent bien aux cycles de gel-dégel [Vahedifard *et al.*, 2010].

La teneur en liant a une grande influence sur les propriétés des BCR. Lorsque le volume de pâte augmente, son effet lubrifiant permet de réduire la friction entre les particules du granulat et ainsi réduire le temps Vebe. L'augmentation de la teneur en ciment permet également d'améliorer les résistances à la compression des BCR [Vahedifard *et al.*, 2010; Hazaree *et al.*, 2011]. L'augmentation des résistances mécaniques n'est toutefois pas linéaire, c'est-à-dire qu'il existe une teneur optimale en liant pour obtenir des résistances maximales. Une teneur trop élevée en ciment diminue la résistance à la compression des BCR [Hazaree *et al.*, 2011].

L'augmentation de la teneur en ciment permet d'améliorer la résistance des BCR soumis à des cycles répétés de gel-dégel [Vahedifard *et al.*, 2010; Hazaree *et al.*, 2011].

2.3 Les bétons moulés à sec

Le moulage à sec du béton est un procédé qui permet la préfabrication en usine d'éléments de maçonnerie, de pavés, de murs de soutènement, de tuyaux, de briques, etc. Aucun coffrage n'est nécessaire lors de l'utilisation de ce procédé : le béton est d'abord placé dans un moule, consolidé, puis immédiatement démoulé. La consolidation est habituellement réalisée à l'aide de vibrations du moule et d'une pression appliquée sur le dessus de l'élément. D'autres techniques de mise en place peuvent être utilisées, tel que la projection par force centrifuge pour la fabrication de tuyaux. La fabrication d'éléments moulés à sec en usine est un procédé automatisé qui permet une production continue et homogène. La cure des échantillons se fait en usine dans des conditions contrôlées.

Tout comme les bétons ordinaires, les performances mécaniques et la durabilité des bétons moulés à sec dépendent de plusieurs facteurs, tels que le rapport E/C, le type et la teneur en liant, le réseau de bulles d'air, la distribution granulométrique, le malaxage, la mise en place, la cure, etc. Tous ces facteurs ont une influence directe sur la microstructure de la pâte et par conséquent, sur les propriétés et les performances du béton.

2.3.1 Le rapport E/C

La littérature est partagée en ce qui concerne les effets du rapport E/C sur les propriétés mécaniques des bétons moulés à sec.

Des travaux ont démontré que la diminution du rapport E/C dans un béton sec permet d'augmenter la résistance à la compression et la résistance à la traction [Turgut, 2008]. Dans ces travaux, différents mélanges contenant de la poudre de verre ont été fabriqués pour mouler des blocs de maçonnerie. Deux mélanges contenant des poussières de pierre calcaire et sans poudre de verre ont été utilisés comme mélanges de référence. Les deux mélanges ont respectivement un rapport E/C de 0,30 et 0,50. La baisse du rapport E/C de 0,50 à 0,30 a permis d'améliorer la résistance à la compression de 10,5 % et la résistance à la flexion de 5,0 %.

Toutefois, dans certains cas, l'augmentation du rapport E/C permet d'améliorer les performances des éléments de maçonnerie préfabriqués. Des essais ont démontré que

l'augmentation du rapport E/C dans des dalles de couverture fabriquées en usine permet d'améliorer les propriétés physiques et la durabilité de ces éléments [Chidiac et Zibara, 2007]. L'augmentation du rapport E/C de 0,34 à 0,40 a permis d'augmenter la densité des dalles, d'augmenter la résistance à la compression de 65 %, d'améliorer la résistance à l'écaillage et la tenue aux cycles de gel-dégel.

À partir des travaux de Turgut (2008) et Chidiac *et al.* (2007), on peut donc déduire qu'un dosage optimal en eau dans les éléments de maçonnerie est nécessaire pour atteindre des performances maximales. Un mélange trop sec sera plus difficile à consolider et aura un plus grand nombre de vides de compaction, tandis qu'un rapport E/L trop élevé a pour effet d'éloigner les grains de ciment les uns par rapport aux autres et de diminuer les performances mécaniques.

2.3.2 Les liants

L'utilisation d'ajouts minéraux permet généralement d'améliorer la résistance à la compression des bétons secs. Dans leurs travaux, Marchand *et al.* (1996) ont étudié différents mélanges de pavés préfabriqués en usine et au laboratoire contenant différents types de liants. Le liant utilisé dans les mélanges produits est soit : du ciment Portland ordinaire (type 10), du ciment contenant 8 % de fumée de silice, ou du ciment Portland ordinaire et des cendres volantes de classe F. Les cendres volantes représentent 20 % de la masse du ciment et sont utilisées en remplacement du sable. Pour un même rapport E/C, la résistance à la compression des bétons fabriqués en usine est de 37 MPa pour le mélange contenant seulement du ciment, 62 MPa pour le mélange avec fumée de silice et de 63 MPa pour le mélange avec cendre volante. Pour la même composition, ces mêmes mélanges fabriqués en laboratoire présentent des résistances respectives de 41, 60 et 50 MPa. Tout comme dans le cas des BCR, l'ajout de matières minérales tel que la fumée de silice et les cendres volantes, permet d'améliorer l'homogénéité de la pâte de ciment dans les bétons moulés à sec. Ces ajouts minéraux permettent de densifier considérablement la microstructure de la pâte de ciment du béton. L'amélioration de l'homogénéité et la densification de la pâte de ciment permettent de contribuer à l'amélioration des performances mécaniques du béton.

L'utilisation de la poudre de verre et de poussières provenant de l'extraction de blocs de roche calcaire s'est également montrée positive en ce qui concerne les propriétés mécaniques de briques en béton sec et de blocs de maçonnerie. Dans ses travaux, Turgut (2008) a fabriqué en laboratoire des briques contenant de la poussière de pierre calcaire. En conservant le même rapport E/C et en remplaçant 10, 20 et 30 % de la poussière calcaire par de la poudre de verre, la résistance à la compression des briques, après 28 jours de cure, a augmenté de 1,8, 7,3 et 9,4 %. Les briques présentent également une augmentation de 85, 86 et 87 % de la résistance à la flexion, comparativement au mélange de référence. La même procédure expérimentale a été utilisée par Turgut pour la fabrication de blocs de maçonnerie. En remplaçant 25, 50 et 75 % de la poussière calcaire par de la poudre de verre, la résistance à la compression des blocs a augmenté respectivement de 6,2, 11,6 et 21,1 %, comparativement à la référence. Pour ces mêmes mélanges, la résistance à la flexion a augmenté de 19, 41 et 77 %.

Turgut (2008) a également étudié la résistance aux cycles de gel-dégel de briques contenant de la poudre de verre. Pour des taux de remplacement de 10, 20, et 30 %, les pertes de masse après 50 cycles de gel-dégel sont de 58, 85 et 94 % inférieurs à celle de la brique de référence. Lors de ce même test, l'apparition de la première fissure dans la brique de référence est apparue après 20 cycles, tandis que pour les mélanges avec 10, 20 et 30 % de poudre de verre, la première fissure est apparue respectivement après 40, 42 et 47 cycles.

L'utilisation de particules fines semble également améliorer la résistance à l'écaillage des bétons secs. Les travaux de Boisvert *et al.* (1992) sur des pavés de béton démontrent que l'emploi de matériaux fins tels que la fumée de silice, le ciment de type 30, et les pigments de coloration (oxyde de fer) améliorent de façon significative la résistance à l'écaillage des pavés. Ce phénomène est encore une fois dû à une meilleure homogénéisation et densification de la pâte de ciment.

Les travaux de Boisvert *et al.* (1992) mentionnent également que la quantité de liant utilisé a une influence directe sur la résistance à l'écaillage des pavés de béton. Deux mélanges ayant des rapports E/C semblables (0,26 et 0,27), le même type de ciment (type 10), la même granulométrie et la même énergie de mise en place ont été fabriqués en usine. La seule différence entre ces mélanges consiste à la teneur en liant qui est de 350 kg/m³ et de 400 kg/m³. Après 50 cycles de gel-dégel, la masse de débris recueillie pour ces deux bétons est

respectivement de 2,75 kg/m² et de 1,19 kg/m². Il est donc possible qu'une quantité minimale de ciment, à tout le moins quand le rapport E/C est inférieur à 0,30, soit nécessaire afin de produire un pavé assez dense et homogène pour être durable.

L'utilisation d'un ciment fin et d'ajouts cimentaires permet donc d'améliorer les performances mécaniques et la durabilité des éléments de maçonnerie soumis à des cycles de gel-dégel. La fumée de silice, les cendres volantes et la poudre de verre semblent permettre ces améliorations en densifiant la pâte de ciment et en la rendant plus homogène.

2.3.3 Le réseau de bulles d'air

Dans des bétons usuels, un réseau de vides d'air inférieur à 210 µm offre une excellente protection contre la détérioration au gel. Cela n'est cependant pas nécessairement vrai en ce qui concerne les bétons secs en général et les pavées de béton, en particulier. Dans les pavés, un grand nombre de vides d'air se présente sous la forme de gros vides de compactage de forme irrégulière et non sous la forme de petites bulles sphériques bien dispersées. L'observation au microscope optique ne permet pas d'évaluer le degré d'interconnexion de ces vides et, par le fait même, leur capacité à protéger la pâte de ciment contre les effets du gel [Boisvert *et al.*, 1992].

Les observations de Boisvert *et al.* (1992) montrent que l'emploi d'un agent entraîneur d'air permet de créer un réseau de petites bulles d'air sphériques à l'intérieur de la pâte de ciment des pavés. Par exemple, pour une même superficie (6,4 mm²), un mélange sans air entraîné présente 25 bulles de diamètre compris entre 1 et 50 µm, comparativement à 113 bulles pour un mélange avec air entraîné. Les pavés avec ou sans entraîneur d'air fabriqués dans les travaux de Boisvert *et al.* (1992) ont tous un facteur d'espacement des vides d'air inférieur à 210 µm. Cependant, dans le cas des pavés, il y a beaucoup plus de vides de compactage (de forme irrégulière) que de bulles d'air sphériques. Il est donc peu probable que cette mesure soit significative pour ce type de béton, et cela pour deux raisons principales : les vides de compactage peuvent être interconnectés, et leur distribution granulométrique est probablement très différente de celle des bétons usuels à air entraîné. Il est fort possible qu'une partie des vides de compactage joue le même rôle que les bulles d'air. Il est toutefois raisonnable de croire qu'un certain pourcentage de ces vides soit interconnecté, ce qui empêcherait de jouer

un rôle quelconque de protection lors du gel. En fait, cette interconnexion favoriserait la saturation de la pâte de ciment et diminuerait d'autant la résistance au gel des pavés.

L'ajout d'un agent entraîneur d'air est sans aucun doute essentiel pour entraîner une quantité minimale de bulles d'air à l'intérieur des pavés et ainsi améliorer les performances à l'écaillage. Les mélanges de pavés en béton fabriqués avec un agent entraîneur d'air ont clairement démontré une meilleure résistance à l'écaillage [Boisvert *et al.*, 1992].

L'utilisation judicieuse d'un agent entraîneur d'air semble donc être l'élément clé pour produire un réseau de bulles d'air de quantité et de qualité suffisantes, afin d'obtenir des pavés résistants aux cycles de gel-dégel. Les vides de compaction de formes irrégulières dans un béton moulé à sec ont un comportement différent des bulles d'air entraîné lorsque le béton est soumis à des cycles de gel dégel.

2.3.4 Le malaxage et la mise en place

Les propriétés des bétons secs préfabriqués dépendent également du malaxage des matériaux et de la mise en place du béton dans les moules. La séquence d'ajout des matériaux lors du malaxage et l'énergie de malaxage sont les principaux facteurs qui influencent l'homogénéité du mélange. L'intensité et le temps de vibration du mélange influencent la densité du béton et par conséquent, ses performances. L'augmentation du temps de vibration a comme conséquence d'améliorer de façon significative la résistance des pavés [Boisvert *et al.*, 1992]. L'augmentation du temps de malaxage et de vibration permet également d'augmenter les résistances mécaniques, de diminuer la porosité capillaire et d'augmenter la résistance à l'écaillage d'éléments de maçonnerie [Chidiac et Zibara, 2007].

Des éléments en béton moulés à sec en usine présentent habituellement une certaine variabilité. Des variations de la résistance à l'écaillage de 1,80 kg/m² à 2,71 kg/m², après 50 cycles de gel dégel, ont pu être observées dans deux mélanges identiques produits en usine [Boisvert *et al.*, 1992]. Des variations dans un même élément peuvent aussi exister. La résistance à la compression aux bordures d'un élément peut être en moyenne 12 % plus élevée qu'au centre de celui-ci [Chidiac et Zibara, 2007]. Ces variations peuvent s'expliquer par un mauvais ajustement ou à l'usure des équipements utilisés pour la préfabrication d'éléments en béton sec.

2.3.5 Mesure de la maniabilité

Jusqu'à ce jour, la courbe de friction interne basée sur la force de cisaillement s'est montrée un des meilleurs paramètres pour décrire les caractéristiques et la consolidation d'un béton sec [Käppi et Nordenswan, 2007]. Le cisaillement mesuré dans un échantillon de béton dépend de plusieurs facteurs, tels la granulométrie du mélange, la teneur en eau, le volume de pâte et l'âge de l'échantillon. L'utilisation d'un compacteur à cisaillement giratoire de type « Intensive Compaction Tester » permet de mesurer les efforts de cisaillement et la densité d'un mélange de béton sec. Un compacteur giratoire applique une force axiale et une force rotative de cisaillement sur un échantillon de béton contenu dans une cellule en acier. Ces deux forces sont appliquées sur les plaques d'acier situées à chaque extrémité de l'échantillon et placées selon un angle déterminé par rapport à la cellule. Lors du processus de compaction, la hauteur de l'échantillon est mesurée, ce qui permet le calcul de la masse volumique. Une représentation schématisée du procédé de compaction d'un « Intensive Compaction Tester » est illustrée à la figure 2.2.

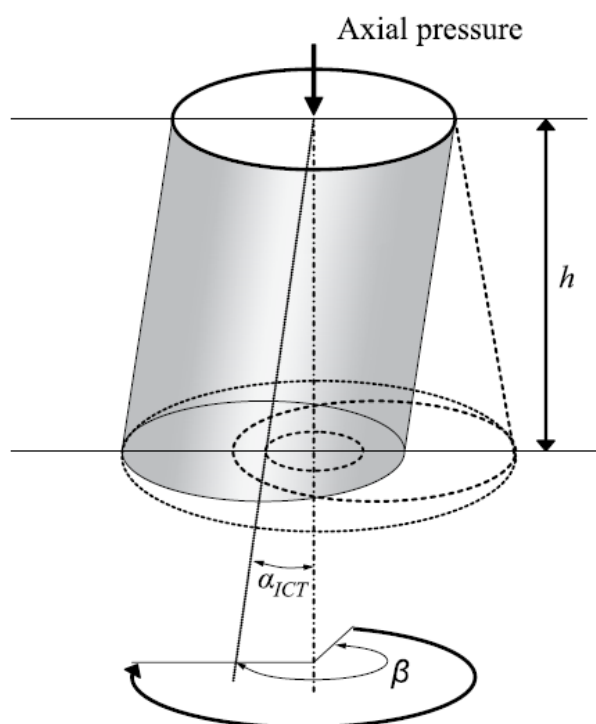


Figure 2.2 – Représentation schématisée du procédé de compaction d'un ICT
[Käppi et Nordenswan, 2007]

2.3.6 La cure

Tout comme les bétons conventionnels, la cure est un facteur déterminant dans la formation de la microstructure des bétons secs. Une cure humide initiale permet d'augmenter la résistance à la compression d'un mélange de maçonnerie moulé à sec, de diminuer la porosité capillaire, et d'améliorer la résistance aux cycles de gel dégel, comparativement à un mélange curé à la vapeur [Chidiac et Zibara, 2007].

2.4 Poussières de pierre calcaire

2.4.1 Provenance et production

Les poussières de pierre calcaire proviennent des procédés de concassage lors de la production de pierre concassée. Le roc dynamité est concassé à l'aide de concasseur primaire, secondaire et tertiaire et tamisé pour permettre d'obtenir la distribution granulométrique désirée. Lors du tamisage, un dispositif de dépoussiérage permet de retirer les particules fines de la chaîne de production. Les poussières de pierre calcaire peuvent représenter jusqu'à 20 % du volume de production de la pierre concassée.

2.4.2 Utilisation

Ce matériau est habituellement vendu sous l'appellation de « chaux agricole » dans le secteur de l'agriculture. L'épandage de ces poussières de pierre permet d'augmenter le pH des sols et d'en améliorer la structure physique. Les poussières de pierre calcaire n'ont peu ou pas d'application dans le domaine de la construction.

2.5 Poussières de béton concassé

2.5.1 Provenance et production

Les poussières de béton concassé proviennent du processus de concassage de béton recyclé provenant de la démolition de bâtiments ou d'ouvrages d'art. Le béton recyclé concassé est utilisé comme matériau granulaire. Les armatures et le béton sont tout d'abord séparés manuellement avant le processus de concassage. Le béton est concassé à l'aide d'un concasseur primaire et d'un concasseur secondaire, puis tamisé pour respecter des critères

granulométriques précis. L'acier qui n'a pas pu être séparé lors du premier tri est récupéré à l'aide d'électro-aimants dans la chaîne de production. Les poussières de concassage représentent approximativement 1 à 2 % du volume de production de granulats recyclés.

2.5.2 Utilisation

Les poussières de béton concassé sont habituellement réintégrées dans la chaîne de production des granulats recyclés. Lorsque la quantité de particules fines est trop importante pour respecter les fuseaux granulaires imposés, les poussières sont retirées de la production et utilisées comme matériaux de remblai non normalisés.

2.6 Utilisation du verre dans le béton

2.6.1 Recyclage du verre

Le verre recyclé se divise en plusieurs catégories : le verre creux, le verre plat, le verre résistant aux produits chimiques et à la chaleur, le verre optique, etc. Le verre creux, principalement utilisé par l'industrie alimentaire, qui sert à la fabrication de bouteilles, de bocaux et de pots, se subdivise en quatre sous-catégories : le verre vert, le verre brun, le verre incolore (aussi appelé verre clair) et le verre mixte (aussi appelé verre mélangé). Il a été estimé que 244 000 tonnes de résidus de verre ont été générées en 2008, seulement au Québec. De ce nombre, 128 000 tonnes ont été recyclées en 2008, dont 59 % était du verre de mixte.

Contrairement au verre incolore ou au verre de couleur, le verre mixte n'a pas une valeur intéressante d'un point de vue économique. Selon la qualité du verre trié, les conditionneurs québécois achètent des centres de tri le verre incolore à un prix variant entre 25 et 30 \$ la tonne, alors que les centres de tri reçoivent entre 0 et 15 \$ la tonne pour le verre de couleur (vert ou brun) et doivent déboursier de 15 à 20 \$ la tonne pour faire traiter le verre mixte chez un conditionneur [Gagné, 2010].

Le grand volume de verre mixte disponible et sa faible rentabilité économique à être recyclé poussent les industries à valoriser ce matériau dans différents produits tels que la peinture, des abrasifs, céramiques, matériaux de sous-fondation, etc. Tout dépendant de sa granulométrie, le verre peut également être utilisé comme granulat ou comme ajout cimentaire dans le béton.

2.6.2 Avantages de l'utilisation du verre dans le béton

L'utilisation de verre recyclé dans la production du béton présente une foule d'avantages se présentant sous différents aspects [Shi et Zheng, 2007]:

- Réduit les coûts d'élimination des déchets qui ont tendance à augmenter dû aux taxes d'enfouissement.
- Préserve l'environnement en économisant d'importantes quantités de matières premières.
- Allonge la durée de vie utile des sites d'enfouissement, et contribue à préserver les territoires.
- Réduit significativement l'énergie consommée, les émissions de CO₂, NO_x, et d'autres polluants atmosphériques causés par la production de ciment, lorsqu'utilisé en remplacement cimentaire dans le béton.
- Augmente la sensibilisation de la population concernant les problèmes du gaspillage et des bienfaits du recyclage.
- Offre des alternatives concernant l'utilisation de produits à base de verre recyclé, sans compromettre les coûts ou la qualité.

L'utilisation du verre mixte recyclé dans le béton est une solution bénéfique tant au point de vue économique, social et environnemental. Par la prise en compte de ces trois aspects, l'utilisation du verre dans le béton s'inscrit dans l'optique du développement durable (voir figure 2.3).

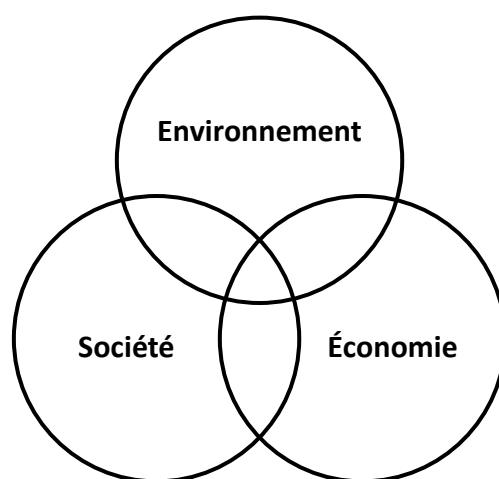
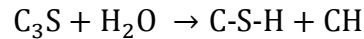


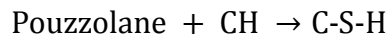
Figure 2.3 – Les trois sphères du développement durable

2.6.3 Activité pouzzolanique du verre

La réaction d'hydratation du ciment Portland est principalement due à la réaction du silicate tricalcique (C_3S) avec l'eau (H_2O). Les produits d'hydratation formés par cette réaction sont le silicate de calcium hydraté (C-S-H) et la portlandite (CH). Cette réaction est rapide et produit un dégagement de chaleur important. La réaction d'hydratation du ciment peut se résumer de cette façon :



La réaction pouzzolanique est un processus lent qui produit des gels de C-S-H de densité plus faible que ceux produits par l'hydratation du ciment. Ces gels sont formés par les pouzzolanes qui consomment la chaux produite lors de l'hydratation du ciment. Cette réaction peut se résumer ainsi :



La réaction pouzzolanique se caractérise par trois caractéristiques principales [Tagnit-Hamou, 1995] :

1. La réaction est lente, tout comme le dégagement de chaleur et le développement de résistances.
2. Au contraire de la réaction d'hydratation du ciment Portland, la réaction pouzzolanique consomme de la chaux et améliore la résistance du béton en milieu acide (baisse du pH).
3. Les produits d'hydratation remplissent les pores capillaires et augmentent la résistance et l'imperméabilité des bétons par affinage des pores capillaires et par transformation des gros cristaux de CH en un produit d'hydratation faiblement cristallisé (affinage des grains).

Plusieurs facteurs influencent l'effet pouzzolanique de la poudre de verre : la composition chimique du verre, la granulométrie, la composition chimique du ciment et la présence d'autres ajouts, la température et le type de cure, la forme des particules, etc.

Taille des particules et réaction pouzzolanique

Différentes études démontrent que la granulométrie de la poudre de verre a une influence sur son efficacité pouzzolanique [Shao *et al.*, 2000], [Shi *et al.*, 2005] et [Idir *et al.*, 2010].

Dans leurs travaux, Shao *et al.* (2000) ont utilisé trois différentes finesses de poudre de verre pour la fabrication de bétons. La première poudre est composée de particules de diamètre compris entre 150 et 75 μm , la deuxième entre 75 et 38 μm , et les particules de la troisième poudre ont un diamètre inférieur à 38 μm . Ces poudres sont nommées respectivement 150- μm , 75- μm et 38- μm . Étant donné la dimension plus grande de ses particules, la poudre 150- μm ne satisfait pas les exigences de la norme ASTM C618 pour se qualifier de pouzzolane. La poudre 75- μm a montré des résultats marginaux, tout dépendant du pourcentage de particules passant le tamis 45 μm . Par conséquent, seulement la poudre 38- μm a une finesse suffisante pour présenter un comportement pouzzolanique. En remplaçant 30 % du ciment par des ajouts minéraux dans des bétons, il a été observé que le mélange avec la poudre de verre 38- μm dépassait la résistance à la compression du mélange avec cendres volantes à 3, 7, 28 et 90 jours. Il a aussi été observé que la résistance à la compression des mélanges augmente en fonction de la finesse de la poudre de verre.

Shi *et al.* ont étudiés des résidus fins de verre provenant d'un fabricant de billes de verre. La première poudre provient du procédé de tamisage du verre concassé (GP-fine), la deuxième est récupérée par le système de dépoussiérage (GP-dust). Les deux autres poudres à l'étude sont broyées plus finement à l'aide d'un broyeur à boulets (GP-4000 et GP-6000). De la granulométrie la plus grossière à la plus fine, les poudres sont respectivement : GP-fine, GP-dust, GP-4000 et GP-6000. À un âge de 7 et 28 jours, l'indice pouzzolanique de GP-fine est de 70 et 74 %, ce qui est légèrement inférieur au minimum de 75 % imposé par la norme ASTM C618. GP-dust a atteint 82 % à 7 jours et 92 % à 28 jours. Les poudres GP-4000 et GP-6000 ont atteint un indice pouzzolanique d'environ 110 % après 28 jours. Ceci démontre encore une fois que la finesse joue un rôle important sur l'activité pouzzolanique de la poudre de verre.

Idir *et al.* ont fabriqué neuf mortiers contenant 20 % de poudre de verre. La finesse de la poudre est différente dans chaque mélange. Le diamètre médian de la poudre de verre

contenue dans ces mélanges varie de 3,750 à 8 μm . La résistance en compression des mélanges augmente lorsque la finesse de la poudre de verre augmente. La résistance à la compression des mortiers est considérablement améliorée lorsque la finesse de la poudre de verre est inférieure à 80 μm . La finesse a donc un lien direct avec l'efficacité pouzzolanique de la poudre de verre.

Température de cure

L'augmentation de la température lors de la cure accélère l'activité pouzzolanique de la poudre de verre [Shi *et al.*, 2005]. Ici, l'auteur a observé qu'en augmentant la température de cure à 35 et 65 °C, l'activité pouzzolanique augmentait significativement de 1 à 28 jours. Lorsque la température de cure augmente de 23 à 65 °C, la résistance à la compression à 7 jours du ciment Portland diminue de 29 à 24 MPa, tandis que celle d'un mélange contenant 20 % de poudre de verre augmente de 27 à 30 MPa. Pour la même augmentation de température de cure, la résistance à la compression à 28 jours du mélange de référence décroît de 35 à 26 MPa, et le mélange avec poudre de verre diminue de 38 à 34 MPa. En résumé, l'augmentation de température de cure est néfaste pour le développement de la résistance à la compression du ciment Portland, mais bénéfique pour la poudre de verre à jeune âge (7 jours).

Réaction alcalis-silice

Deux types de réaction alcali-granulats peuvent se produire dans le béton : les réactions alcalis-carbonate et alcalis-silice. La réaction alcalis-silice (RAS) est la plus fréquente dans les bétons. Trois conditions doivent être réunies simultanément pour permettre la réaction alcalis-granulats : les granulats doivent être potentiellement réactifs, la concentration en alcalis dans la solution interstitielle du béton doit être suffisamment élevée et le béton doit être humide [Aïtcin, 2001]. La réaction alcalis-silice produit des gels expansifs qui peuvent fissurer le béton et causer des dommages importants aux ouvrages.

En plus de jouer un rôle important pour le développement de la résistance à la compression, la finesse de la poudre de verre semble être un facteur déterminant pour contrôler la réaction alcali-silice. Idir *et al.* (2010) ont conclu que l'utilisation de poudre de verre ayant un diamètre inférieur à 1 mm permettait de réduire l'expansion causée par la réaction alcalis-silice. À l'opposé, l'utilisation de particules plus grandes que 1 mm augmente considérablement

l'expansion dans les mortiers de ciment. Ces observations ont été faites sur des mortiers contenant 20 % de poudre de verre en remplacement du sable, un rapport E/C de 0,60 et une teneur en alcalin ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$) de 5,6 kg/m³ de mortier.

Shi *et al.* (2005) ont également mesuré l'expansion de mortier (ASTM 311) contenant 20 % de poudre de verre légèrement plus grossière que du ciment Portland. L'expansion de l'éprouvette de mortier mesurée jusqu'à 21 jours demeure inférieure à celle du mélange de référence sans poudre de verre.

Des résultats similaires ont également été obtenus par Shao *et al.* (2000). Avec un taux de remplacement cimentaire de 30 %, des éprouvettes de mortier contenant de la poudre de verre d'un diamètre maximal de 150 et 75 μm ont présenté des expansions similaires au mélange de référence, sans poudre de verre. L'utilisation de 30 % de poudre de verre d'un diamètre maximal de 38 μm a permis de réduire de moitié l'expansion des éprouvettes de mortier avec granulats réactifs. L'utilisation d'une poudre de verre d'une finesse suffisante permet donc de réduire les expansions causées par la RAS.

Des travaux ont démontré que les bétons secs ont de meilleures performances à la RAS que les bétons ordinaires (wet mixed) [Lee *et al.*, 2011]. Des éprouvettes ont été fabriquées utilisant du verre concassé en remplacement du sable. Les dimensions maximales des particules de verre utilisées sont : 5, 2,35, 1,18 et 0,60 mm. Les tests d'expansion ont été réalisés selon la méthode d'essai ASTM C 1260. Après 14 et 28 jours, tous les mélanges ont montré une expansion supérieure au mélange de référence fabriqué avec du sable. Par contre, l'expansion des mélanges diminue en fonction du diamètre des particules de verre utilisées. Les mélanges mélangés à sec (dry mixed) se sont montrés plus efficaces pour diminuer les expansions causées par la RAS, comparativement aux mélanges plus humides (wet mixed). Cette performance est encore plus marquée pour les mélanges fabriqués avec les particules les plus grossières (les plus réactives). La capacité des bétons secs à réduire l'expansion causée par la RAS est probablement due à la plus grande porosité du mélange et aux plus grands diamètres des pores capillaires. Cette plus grande porosité permettrait de loger les gels expansifs produits par la RAS et ainsi réduire les expansions et les fissures. Il serait donc envisageable d'utiliser des particules de verre plus grossières dans des éléments de béton sec, tout en évitant des dommages causés par la réaction alcalis-silice.

Pénétration des ions chlore

L'essai accéléré de pénétration des ions chlore (ASTM C 1202) consiste à mesurer la charge que traverse un courant électrique au travers d'un échantillon de béton saturé. La première face de l'échantillon est en contact avec une solution de chlorure de sodium et la seconde avec une solution d'hydroxyde de sodium. La charge totale (en Coulomb) mesurée pendant 6 heures fournit une indication de la résistivité ou de la conductivité du béton et est utilisée comme un indice de la pénétrabilité des ions chlore à l'intérieur du béton.

Différentes études ont démontré le potentiel de la poudre de verre à réduire la pénétration des ions chlores dans le béton [Jain et Neithalath, 2010; Shayan et Xu, 2006; Wang *et al.*, 2009].

Jain *et al.* (2010) ont mesuré la pénétration des ions chlore dans des bétons contenant 10 et 20 % de poudre de verre d'un diamètre médian de 20 μ m et 10 et 20 % de cendres volantes de classe F, en remplacement du ciment. L'essai accéléré de conductivité a été réalisé 28, 56 et 90 jours après la fabrication des bétons. À ces âges, les bétons contenant de la poudre de verre et des cendres volantes ont montré une réduction de la conductivité, comparativement au mélange de référence sans ajout cimentaire. Ce phénomène s'explique principalement par la réaction pouzzolanique des ajouts cimentaires qui permet la densification de la structure des pores capillaires. Après 56 et 90 jours de cure, la conductivité des mélanges contenant 20 % d'ajouts cimentaires s'est montrée inférieure à celle des mélanges en contenant 10 %.

Selon l'auteur, l'utilisation de cette méthode pour comparer des bétons avec et sans poudre de verre demeure toutefois discutable. En effet, la présence d'une solution de plus grande conductivité dans les pores du béton augmente la valeur de la charge mesurée, pour une microstructure identique. Il a été observé que la poudre de verre, qui a une teneur élevée en Na₂O, relâche une faible quantité d'alcalis dans la solution interstitielle, augmentant par conséquent la conductivité électrique de celle-ci. Malgré cette augmentation de conductivité, les mélanges avec poudre de verre ont donné des résultats inférieurs au mélange de référence. La viscosité de la solution interstitielle peut également influencer les résultats obtenus à l'aide de l'essai ASTM C 1202. La libération des ions alcalins augmente la viscosité de la solution interstitielle et entrave le transport des ions chlores, ce qui a comme conséquence de réduire la charge totale traversant l'échantillon. Puisqu'une faible quantité d'alcalis sont relâchés dans la

solution, l'augmentation de la viscosité de la solution ne devrait pas augmenter significativement. Finalement, s'il est assumé que l'augmentation de la charge totale causée par la faible augmentation de la conductibilité de la solution interstitielle est compensée par l'augmentation de la viscosité de la solution affectant les mouvements ioniques, la méthode utilisée pour mesurer la pénétration des ions chlorures demeure un bon indicateur de la microstructure des bétons avec poudre de verre.

Shayan *et al.* (2006) ont réalisé des travaux sur des dalles de béton fabriquées avec différentes proportions de poudre de verre (diamètre nominal de 10 μ m) et de granulats fins en verre concassé. La pénétration des ions chlorure a été mesurée après 220 et 380 jours sur des échantillons carottés dans les dalles. Les tests à 380 jours ont été faits en duplicata sur des échantillons provenant de cylindres prélevés lors de la coulée des dalles. Ces échantillons ont subi une cure humide jusqu'à la réalisation de l'essai. Tous les mélanges contenant de la poudre de verre (avec ou sans granulats de verre) ont présenté une perméabilité significativement plus faible aux ions chlorure, comparativement au mélange de référence sans poudre de verre. La conductivité des mélanges avec poudre de verre a diminué entre 220 et 380 jours. De plus, les échantillons curés à l'humidité ont montré une conductivité plus faible que celle des échantillons carottés. La microstructure du béton continue donc à se développer après un an, grâce à l'activité pouzzolanique de la poudre de verre. L'effet bénéfique de la poudre de verre est tout particulièrement marqué lorsque le béton est conservé dans des conditions où l'humidité ambiante est élevée.

Wang *et al.* (2009) ont également étudié la pénétration des ions chlorure dans les bétons contenant 25 et 50 % de poudre de verre. Un taux de remplacement de 25 % du ciment par la poudre de verre augmente la migration des ions chlorure après 7 jours, n'a pas d'effet marqué à 28 jours et diminue la migration des ions après 90 jours, comparativement au mélange de référence. Pour un taux de remplacement de 50 %, la conductivité du béton est plus grande de la référence après 7 jours, mais légèrement inférieure à celle-ci après 28 jours. La baisse de conductivité entre 28 et 90 jours est toutefois très faible. Ces résultats montrent encore une fois l'efficacité de la poudre de verre à augmenter la discontinuité des pores capillaires et bloquer la migration des ions chlorure dans le béton.

3. OBJECTIFS DU PROJET ET MÉTHODOLOGIE

3.1 Objectifs du projet de recherche

L'objectif général du projet de recherche est de développer des ajouts cimentaires alternatifs (ACA) obtenus à partir de sous-produits industriels et contribuant à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Plus spécifiquement, le projet porte sur l'incorporation de matériaux fins recyclés dans des bétons compactés au rouleau et dans les bétons moulés à sec. Les matériaux à l'étude sont de la poudre de verre mixte (PV), des poussières de pierre calcaire concassée (PPC) et des poussières de béton recyclé concassé (PBC).

Afin d'évaluer le potentiel d'utilisation des ACA, le projet de recherche se divise en trois axes spécifiques qui portent respectivement sur l'étude des BCR et BCP, des bétons moulés à sec fabriqués en usine et des bétons moulés à sec fabriqués en laboratoire. Les objectifs spécifiques de ces trois axes sont les suivants :

- Mesurer la maniabilité, la résistance à la compression et la résistance à la flexion des bétons compactés au rouleau (BCR) et des bétons compactés à la paveuse (BCP) contenant de la poudre de verre, des poussières de pierre calcaire et des poussières de béton concassé. Faire l'analyse qualitative de la microstructure des BCP avec poudre de verre à l'aide de l'essai de pénétration des ions chlore.
- Mesurer la masse volumique, l'absorption, la résistance à la compression et la durabilité à l'écaillage d'éléments en béton moulés à sec en usine contenant de la poudre de verre.
- Mesurer la maniabilité, la masse volumique, l'absorption, la résistance à la compression et la résistance à la traction des bétons moulés à sec fabriqués en laboratoire contenant de la poudre de verre, des poussières de pierre calcaire et des poussières de béton concassé.

3.2 Méthodologie

3.2.1 BCR et BCP

Différents mélanges sont produits en laboratoire afin d'évaluer le comportement des ajouts cimentaires alternatifs dans les BCR et les BCP. Le rapport E/L utilisé dans les BCR est de 0,32 et celui dans les BCP de 0,37. Pour chaque type de béton, deux mélanges de référence sont fabriqués, soit un mélange contenant seulement du ciment de type GU et un mélange contenant du ciment de type GUb-SF.

La poudre de verre est utilisée en remplacement massique du ciment. Les taux de remplacement du ciment par la poudre de verre sont de 10, 15, 20 et 25 %. Le volume de pâte est maintenu constant dans les mélanges respectifs de BCR et de BCP afin d'obtenir des mélanges ayant une maniabilité semblable.

Les poussières de pierre calcaire sont utilisées en remplacement de 10 et 15 % du volume du ciment dans les mélanges de BCR et de BCP.

Les poussières de béton concassé sont utilisées en remplacement partiel du ciment et du sable. Dans les mélanges de BCR et de BCP, 10 et 15 % du volume de ciment est remplacé par ces poussières. La quantité totale de poussières et de sable est ajustée afin d'obtenir la même distribution granulaire que les mélanges de référence.

La maniabilité des mélanges à l'état frais est mesurée en laboratoire en fonction du temps Vebe. Ensuite, la résistance à la compression est mesurée 7, 28 et 91 jours suivant la date de confection et la résistance à la flexion est mesurée après 7 et 28 jours. De plus, la pénétration aux ions chlore est mesurée sur les BCP. Ces essais sont réalisés après 28, 56 et 91 jours sur les mélanges de référence et sur les mélanges contenant 15 et 25 % de poudre de verre.

Le digramme présenté à la figure 3.1 montre les mélanges de BCR et de BCP fabriqués en laboratoire pour ce projet et les essais réalisés sur ceux-ci.

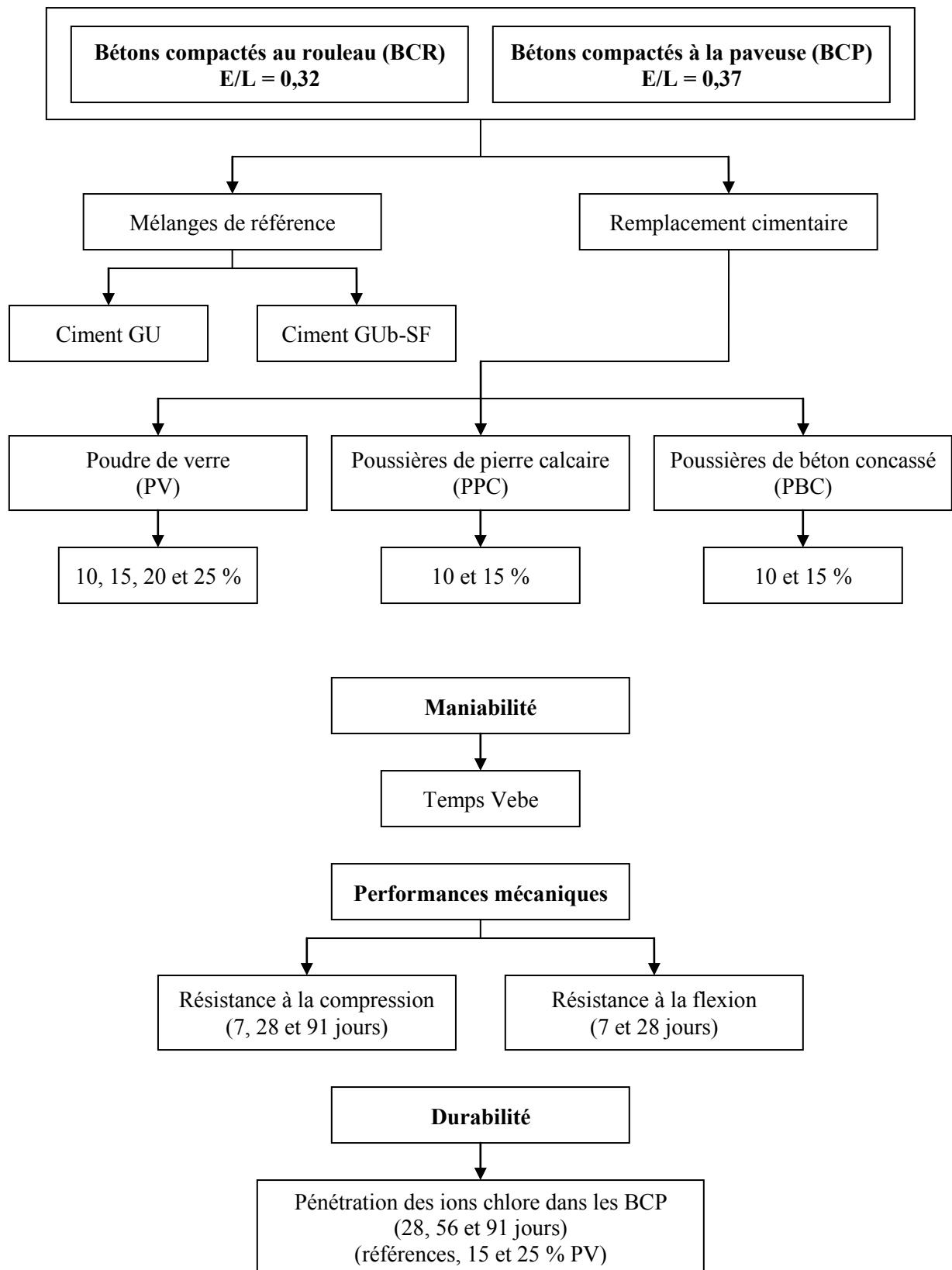


Figure 3.1 – Programme expérimental des BCR et BCP

3.2.2 Bétons moulés à sec en usine

Blocs de maçonnerie

Afin d'évaluer le potentiel d'utilisation de la poudre de verre dans des éléments de béton moulés à sec, des blocs de maçonnerie contenant différents taux de poudre de verre sont fabriqués en usine. La poudre de verre est utilisée en remplacement du filler et en remplacement partiel du ciment. Ces taux de remplacement représentent 10, 15, 20, 25 et 30 % de la masse des matériaux cimentaires. Un mélange contenant seulement du ciment GU est utilisé comme référence. Les blocs de maçonnerie fabriqués en usine d'une épaisseur de 190 mm ont les dimensions indiquées à la figure 3.2.

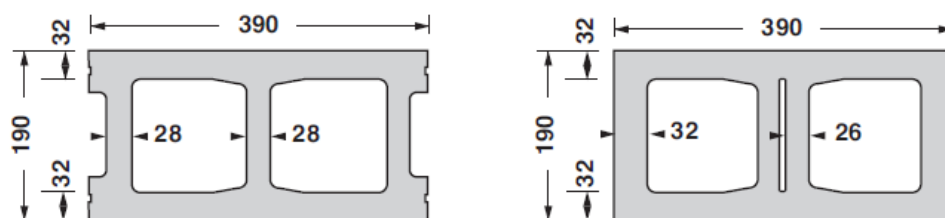


Figure 3.2 – Blocs de maçonnerie (dimensions en mm)
[Permacon.ca]

La résistance à la compression des blocs de maçonnerie est mesurée 3, 7, 14, 28 et 91 jours après la date de fabrication. La masse volumique et l'absorption des blocs sont mesurées après 28 jours.

Pavés

Les pavés fabriqués en usine contiennent 15, 20, 25 et 30 % de poudre de verre en remplacement massique du ciment. Un mélange contenant seulement du ciment GU PR est utilisé comme référence. Ce ciment a comme propriété d'être plus pâle et d'avoir une prise plus rapide qu'un ciment GU.

La résistance à la compression des pavés est mesurée 28 et 91 jours après la date de fabrication. La masse volumique et l'absorption des pavés sont mesurées après 28 jours. L'essai d'écaillage est également réalisé sur les pavés âgés de 28 jours. Le diagramme présenté à la figure 3.3 montre les mélanges de béton fabriqués en usine et les essais réalisés sur ceux-ci.

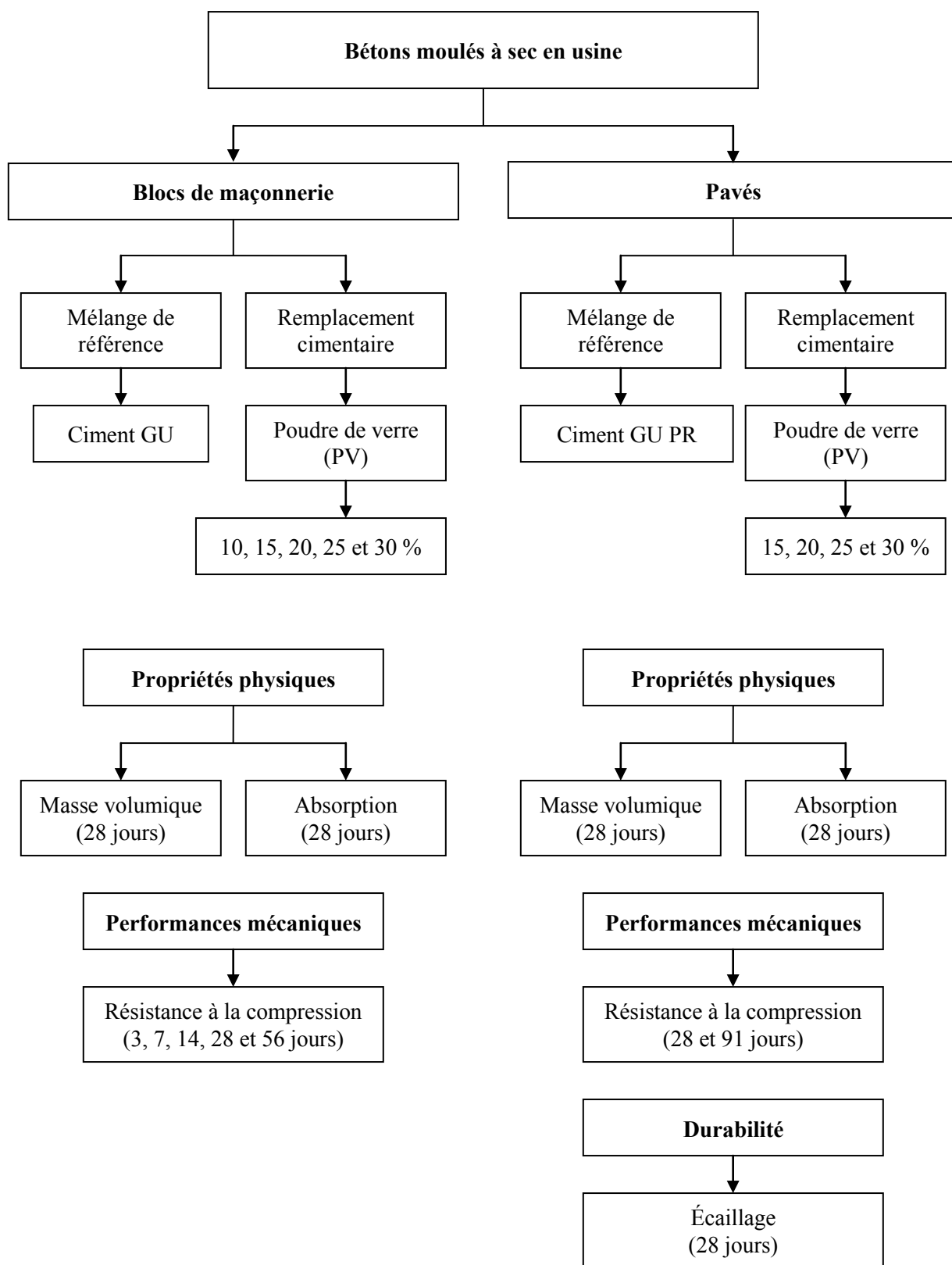


Figure 3.3 – Programme expérimental des bétons moulés à sec en usine

3.2.3 Bétons moulés à sec en laboratoire

Des bétons moulés à sec sont produits en laboratoire pour évaluer la performance des ajouts cimentaires alternatifs. Deux mélanges de référence sont produits : le premier contenant seulement du ciment GUb-S et le deuxième, du ciment GUb-SF.

La poudre de verre est utilisée en remplacement volumétrique du ciment GUb-S, à des taux de 15, 20, 25 et 30 %.

Les poussières de concassage sont pour leur part utilisées en remplacement partiel du ciment et du sable. Dans les mélanges de bétons moulés à sec, 10 et 15 % du volume de ciment est remplacé par les poussières de pierre calcaire ou par les poussières de béton concassé. La quantité totale de poussière de concassage et de sable est ajustée afin d'obtenir la même distribution granulaire que les mélanges de référence.

La maniabilité des mélanges de bétons moulés à sec est évaluée à l'aide d'un compacteur giratoire qui permet de mesurer le cisaillement interne d'un échantillon, en fonction du nombre de cycles de compactage. La résistance à la compression des échantillons cylindriques formés par la presse à cisaillement giratoire est ensuite mesurée après 28 et 91 jours. La résistance à la traction est également mesurée après 28 jours sur ce même type d'échantillon.

Le digramme présenté à la figure 3.4 montre les mélanges de béton fabriqués en laboratoire et les essais réalisés sur ceux-ci.

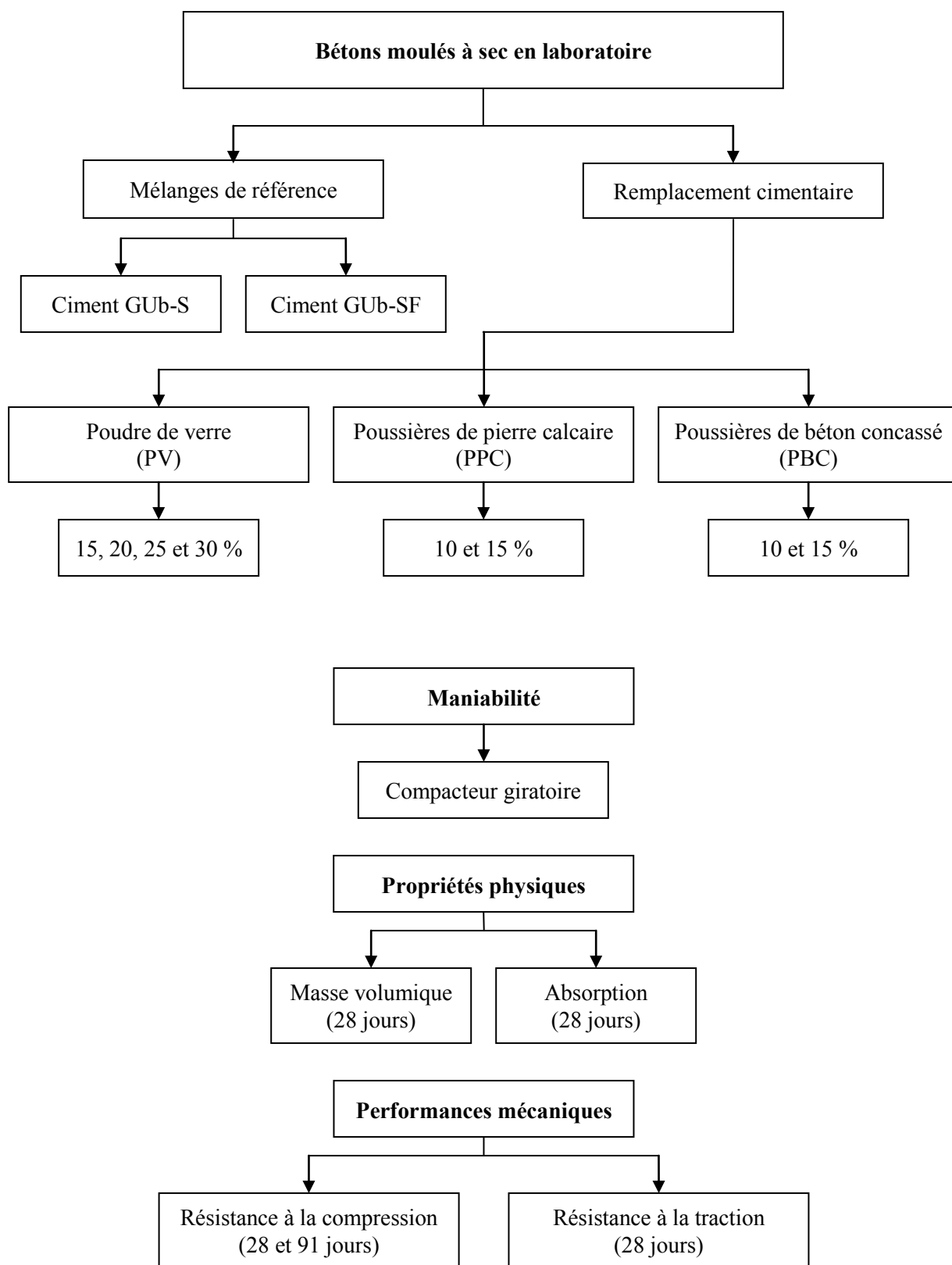


Figure 3.4 – Programme expérimental des bétons moulés à sec en laboratoire

4. MATÉRIAUX

4.1 Ciment

Les ciments utilisés pour la confection de béton en laboratoire sont fabriqués par la compagnie Holcim (Canada) inc. et proviennent de l'usine se situant à Joliette (Québec). Le ciment est livré en vrac dans des sacs géants, puis stocké dans une pièce à environnement contrôlé, dans les laboratoires de l'Université de Sherbrooke.

4.1.1 Ciment dans les bétons compactés au rouleau

Deux types de ciment sont utilisés pour la fabrication des bétons compactés au rouleau, soit du ciment GU ou du ciment GUb-SF. Le ciment GUb-SF contient 8 % de fumée de silice. Les propriétés chimiques et physiques des ciments sont présentées au Tableau 4.1. Les courbes granulométriques de ces ciments sont présentées à la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

4.1.2 Ciment dans les bétons moulés à sec

Deux types de ciment sont utilisés pour la fabrication des bétons moulés à sec en laboratoire, soit du ciment GUb-S et du ciment GUb-SF. Le ciment GUb-S contient approximativement 10 % de laitier de haut fourneau. Le ciment GUb-SF est le même que celui utilisé dans les mélanges de bétons compactés au rouleau et contient donc 8 % de fumée de silice. Les propriétés chimiques et physiques des ciments sont présentées au tableau 4.1.

Tableau 4.1 – Propriétés chimiques et physiques du ciment GU, GUb-SF et GUb-S

Caractéristiques chimiques	GU	GUb-SF	GUb-S
Dioxyde de silicium (SiO ₂)	20,4 %	25,6 %	22,5 %
Oxyde d'aluminium (Al ₂ O ₃)	4,6 %	4,1 %	5,1 %
Oxyde de fer (Fe ₂ O ₃)	2,8 %	2,7 %	2,4 %
Oxyde de calcium total (CaO)	62,7 %	58,5 %	59,7 %
Oxyde de magnésium (MgO)	1,9 %	1,7 %	2,5 %
Trioxyde de soufre (SO ₃)	3,4 %	3,0 %	3,5 %
Perte au feu	2,4 %	2,9 %	2,7 %
Alcalis (Na ₂ O équ.)	0,80 %	0,78 %	0,78 %
Caractéristiques physiques			
Masse volumique	3,17 g/cm ³	3,10 g/cm ³	3,04 g/cm ³
Finesse Blaine	376 m ² /kg	484 m ² /kg	401 m ² /kg

4.2 Poudre de verre

La poudre de verre utilisée dans ce projet est provient de la compagnie Tricentris. Cette poudre est obtenue à partir du broyage du verre mixte concassé et se compose principalement de silice amorphe. La figure 4.1 présente la granulométrie de la poudre de verre, en comparaison avec un ciment de type GU. Le tableau 4.2 présente la caractérisation chimique et physique de cette même poudre.

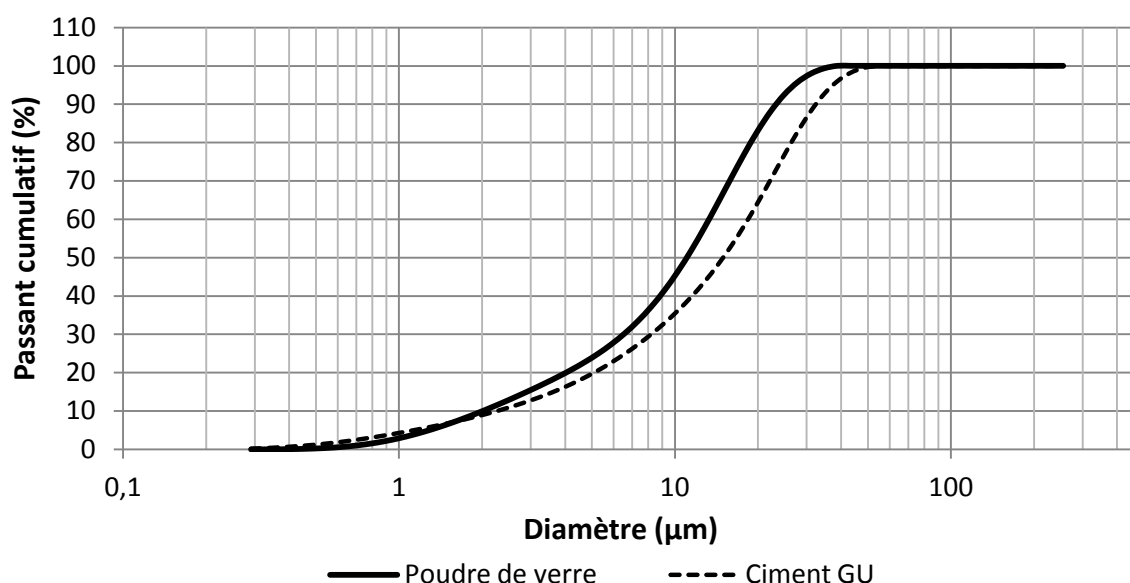


Figure 4.1 – Granulométrie cumulée de la poudre de verre

Tableau 4.2 – Caractéristiques de la poudre de verre

Caractéristiques chimiques	Teneur
Dioxyde de silicium (SiO ₂)	74,07 %
Oxyde d'aluminium (Al ₂ O ₃)	1,97 %
Oxyde de fer (Fe ₂ O ₃)	0,44 %
Oxyde de calcium total (CaO)	13,56 %
Oxyde de magnésium (MgO)	1,26 %
Trioxyde de soufre (SO ₃)	0,20 %
Oxyde de potassium (K ₂ O)	0,62 %
Oxyde de sodium (Na ₂ O)	7,19 %
Chlore (Cl)	0,05 %
Dioxyde de titane (TiO ₂)	0,14 %
Pentoxyde de phosphore (P ₂ O ₅)	0,02 %
Perte au feu	0,47 %
Alcalis équivalents (K ₂ O*0.658+Na ₂ O)	7,60 %
Caractéristiques physiques	Valeur
Masse volumique	2,54 g/cm ³
Finesse Blaine	382 m ² /kg

La forme bombée de la courbe de diffraction aux rayons X présentée à la figure 4.2 indique l'état amorphe de la poudre de verre. La poudre de verre est constituée principalement de silice vitreuse. Cet état vitreux est obtenu lors du refroidissement rapide du sable siliceux lors du procédé de fabrication du verre. L'absence de pic distinct dénote l'absence d'élément cristallin dans la composition du matériau.

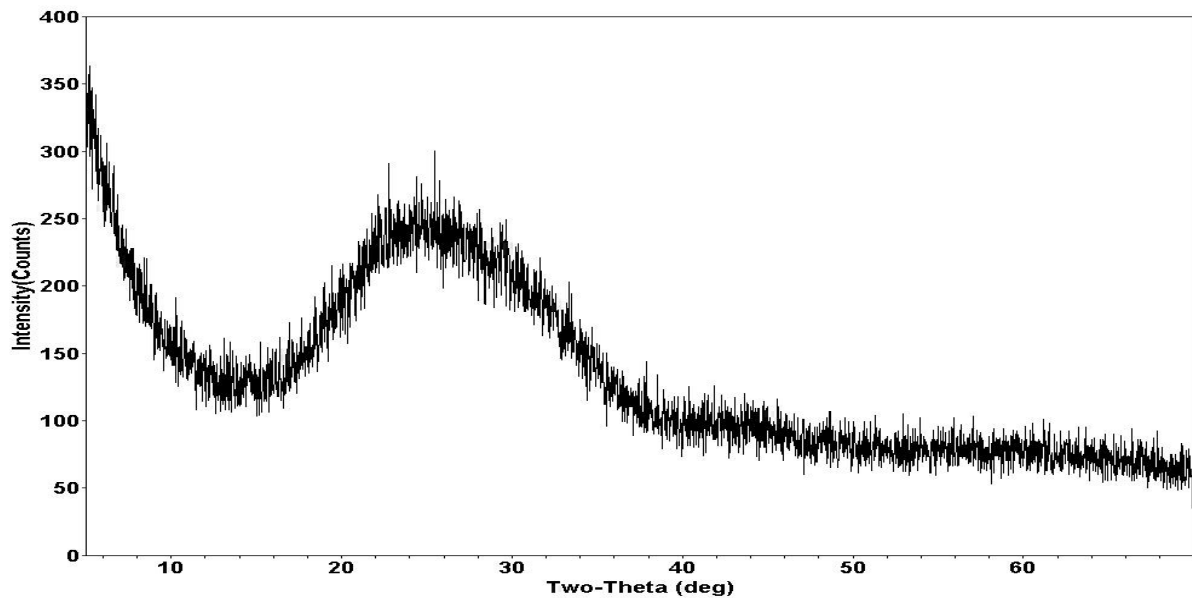


Figure 4.2 – DRX de la poudre de verre

4.3 Poussières de concassage

Les procédés de production de pierre concassée produisent une quantité considérable de particules fines. Les poussières de pierre utilisées dans ce projet proviennent des activités de concassage de pierre calcaire de la Carrière Acton Vale ltée. Les poussières de béton concassé utilisées dans ce projet sont produites par le Groupe Bauval inc. et proviennent du processus de concassage du béton recyclé. Ce béton provient à 95 % de la démolition d'infrastructures municipales.

Un tamisage mécanique et une analyse à l'aide d'un granulomètre laser ont été réalisés pour déterminer la granulométrie des poussières de concassage. La distribution granulométrique des particules ayant un diamètre supérieur à 80 μm a premièrement été déterminée par tamisage mécanique, puis la partie passant le tamis 80 μm a été déterminée à l'aide d'un granulomètre au laser. La cassure des courbes granulométriques présentées à la figure 4.3 s'explique par la différence de précision entre ces deux méthodes utilisées.

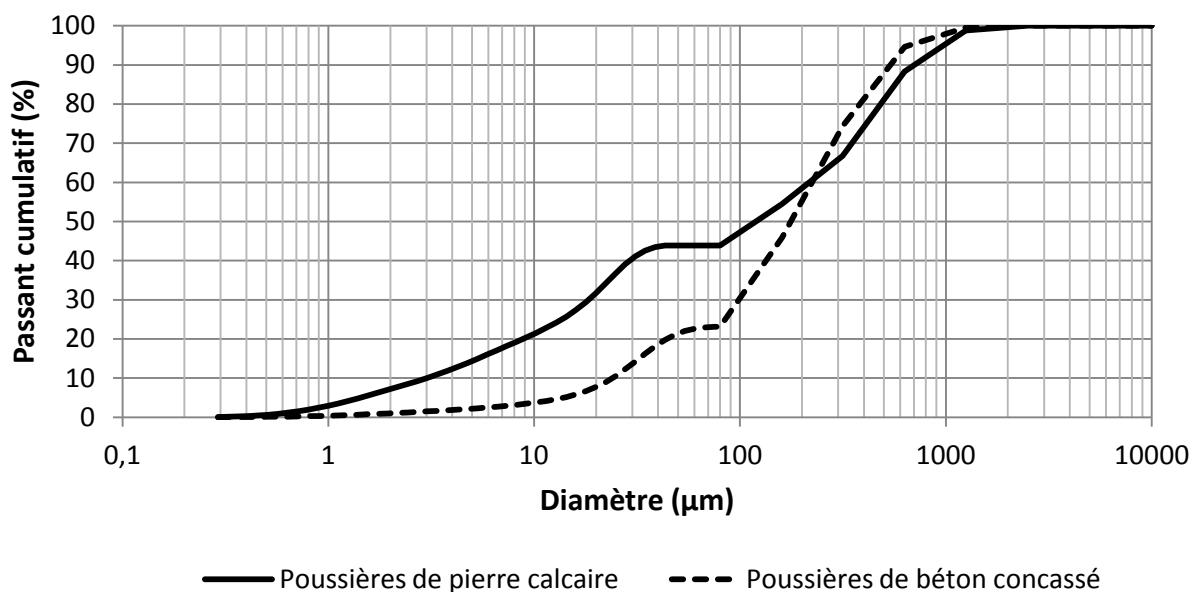


Figure 4.3 – Courbes granulométriques des poussières de concassage

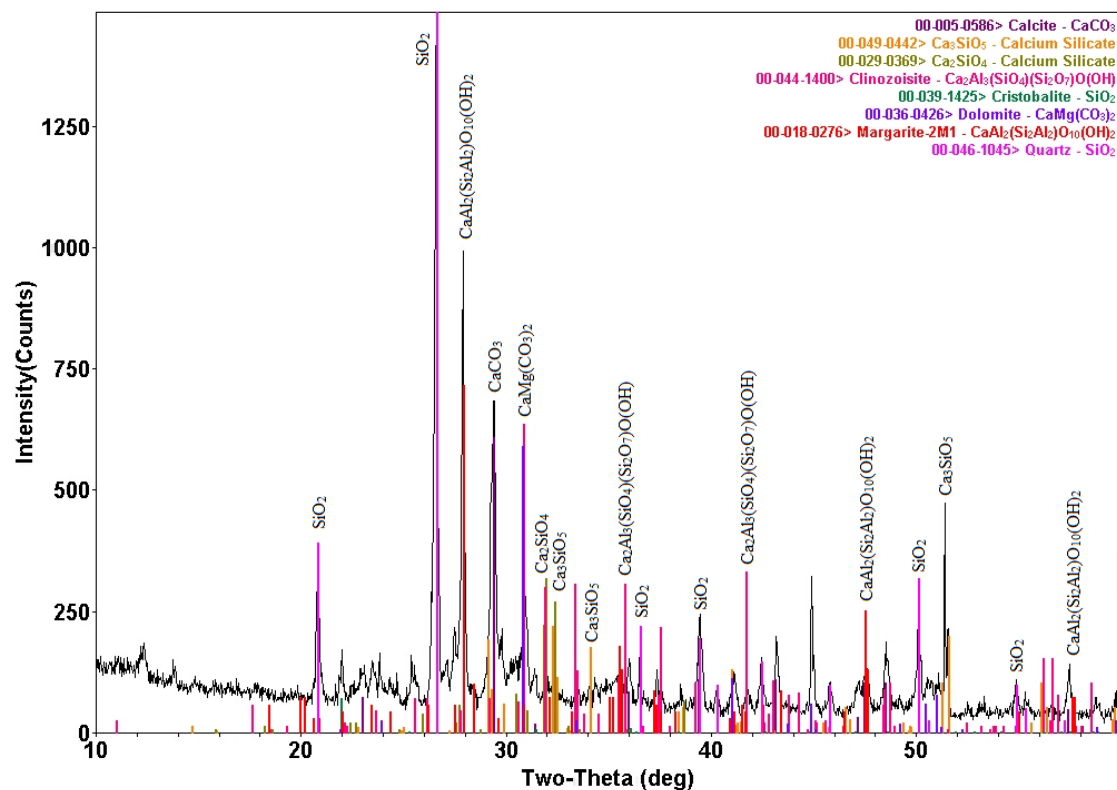
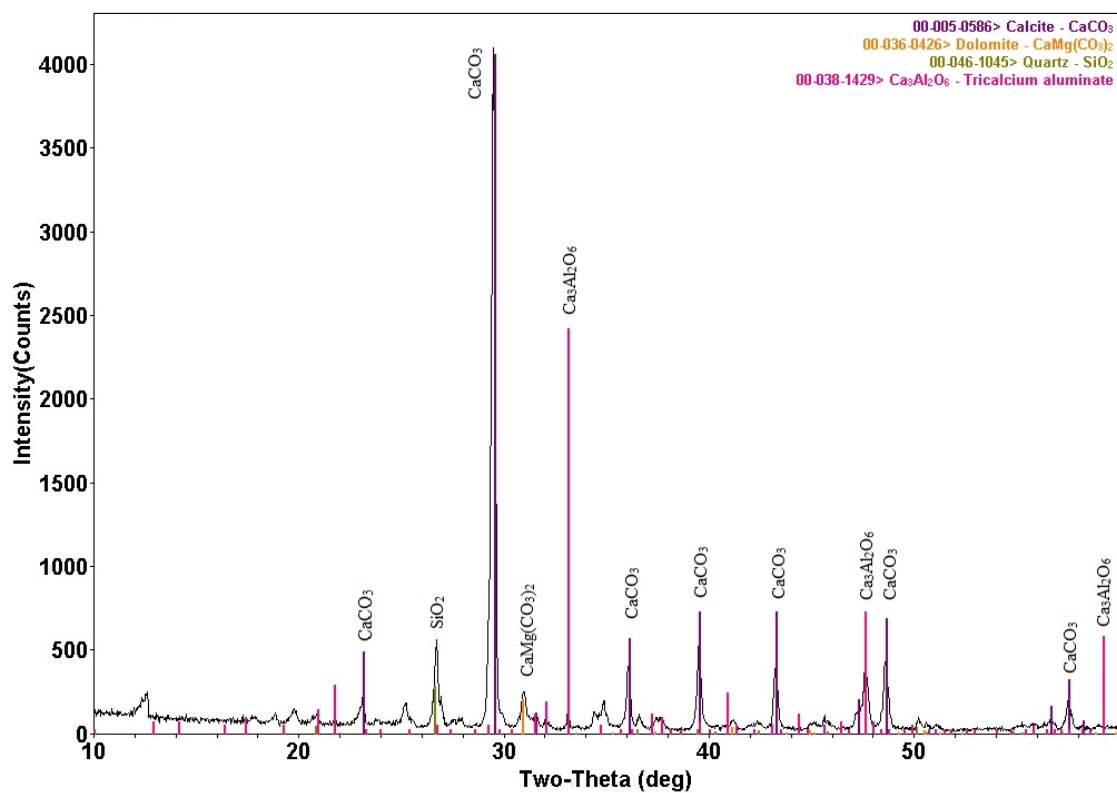
Les propriétés chimiques et physiques des poussières de concassage sont présentées au tableau 4.3 et au tableau 4.4. Afin de connaître la composition chimique de ces poussières, une analyse quantitative a été réalisée par spectrométrie de fluorescence X. La diffraction aux rayons X de ces deux matériaux est présentée à la figure 4.4 et à la figure 4.5. La densité des poudres a été mesurée à l'aide d'un pycnomètre à hélium et l'absorption des poussières de concassage a été estimée à l'aide de la méthode utilisée pour déterminer l'absorptivité d'un sable (NQ 2560-065). Cet essai consiste à déterminer l'humidité nécessaire pour permettre au matériau fin d'avoir tout juste la cohésion nécessaire pour former un cône tronqué, lorsque compacté dans un moule prévu à cet effet. Lorsqu'un cône n'ayant qu'un faible affaissement est formé, le matériau a atteint l'état saturé superficiellement sec (sss).

Tableau 4.3 – Caractéristiques chimiques des poussières de concassage

Éléments	Poussières de pierre calcaire	Poussières de béton concassé
SiO ₂	22,83 %	41,79 %
TiO ₂	1,14 %	0,52 %
Al ₂ O ₃	8,34 %	8,63 %
Fe ₂ O ₃	6,05 %	3,94 %
Mn ₃ O ₄	0,18 %	0,08 %
MgO	1,99 %	2,00 %
CaO	31,93 %	21,43 %
Na ₂ O	0,00 %	0,40 %
K ₂ O	2,97 %	2,28 %
P ₂ O ₅	0,30 %	0,23 %
SO ₃	0,66 %	0,87 %
Cr ₂ O ₃	0,00 %	0,00 %
SrO	0,01 %	0,06 %
ZrO ₂	0,01 %	0,03 %
BaO	0,05 %	0,07 %
CuO	0,02 %	0,01 %
PbO	0,07 %	0,06 %
HfO ₂	0,15 %	0,15 %
Cl	0,00 %	0,00 %

Tableau 4.4 – Caractéristiques physiques des poussières de concassage

Caractéristique	Poussières de pierre calcaire	Poussières de béton concassé
Densité	2,45 g/cm ³	2,23 g/cm ³
Absorption	0,62 %	14,7 %



4.4 Matériaux granulaires

4.4.1 Agrégats dans les bétons compactés au rouleau

Les granulats utilisés dans la fabrication des BCR sont du sable naturel et de la pierre calcaire. La distribution granulométrique du sable a été mesurée par tamisage mécanique jusqu'à un diamètre minimal de 80 μm . Les grains de sable traversent à 99 % le tamis 5 mm. La granulométrie de la pierre a également été mesurée par tamisage mécanique, jusqu'à un diamètre minimal de 1,25 mm. La dimension maximale des granulats est respectivement de 10, 14 et 20 mm. Les courbes granulométriques du sable et de la pierre sont illustrées à la figure 4.6. La densité apparente, la densité brute, la densité à l'état saturé superficiellement sec (sss) et l'absorption des matériaux granulaires ont été mesurées en laboratoire. Ces propriétés sont présentées au tableau 4.5.

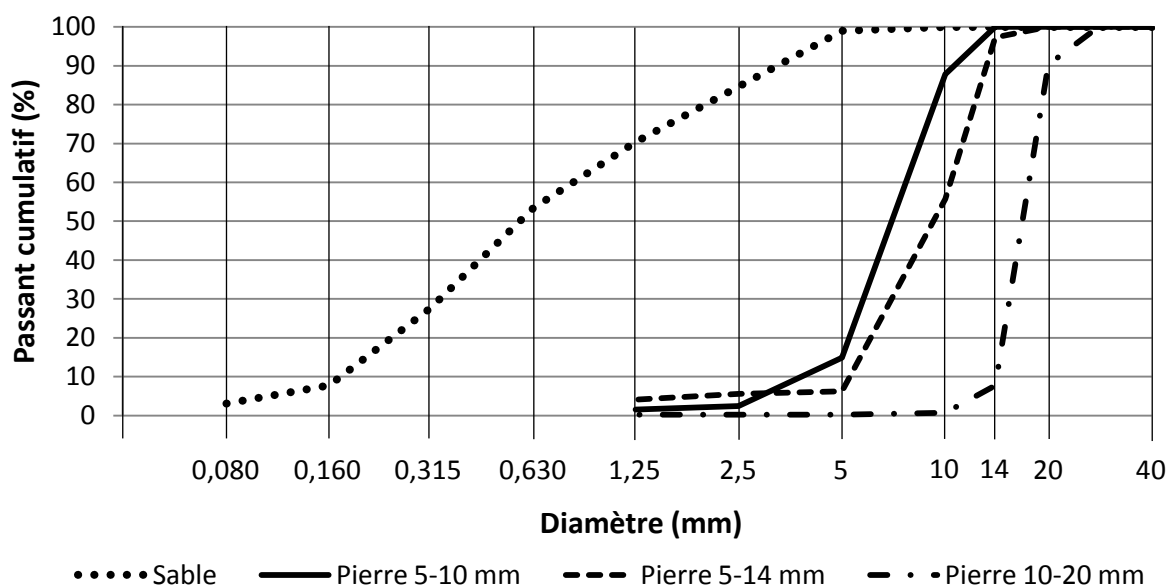


Figure 4.6 – Courbes granulométriques des granulats pour BCR

Tableau 4.5 – Caractéristiques physiques des granulats pour BCR

Matériau	Densité brute	Densité sss	Densité apparente	Absorption
Sable	2,62	2,66	2,71	1,18 %
Pierre 5-10 mm	2,76	2,77	2,79	0,51 %
Pierre 5-14 mm	2,73	2,74	2,76	0,43 %
Pierre 10-20 mm	2,72	2,74	2,76	0,52 %

4.4.2 Granulats dans les bétons moulés à sec

Les granulats utilisés pour la fabrication des mélanges de bétons moulés à sec proviennent des réserves de l'usine Permacon située à Metcalfe, à l'exception du sable 2 qui provient du laboratoire de l'Université de Sherbrooke. Ce dernier est le même sable utilisé dans les mélanges de BCR. La taille nominale des granulats utilisés dans les bétons moulés à sec est de 2, 3 et 5 mm. La granulométrie et les caractéristiques physiques du sable 1 et de la pierre ont été fournies par la compagnie Permacon. La granulométrie des sables et des granulats est présentée à la figure 4.7 et leurs propriétés physiques sont présentées au tableau 4.6.

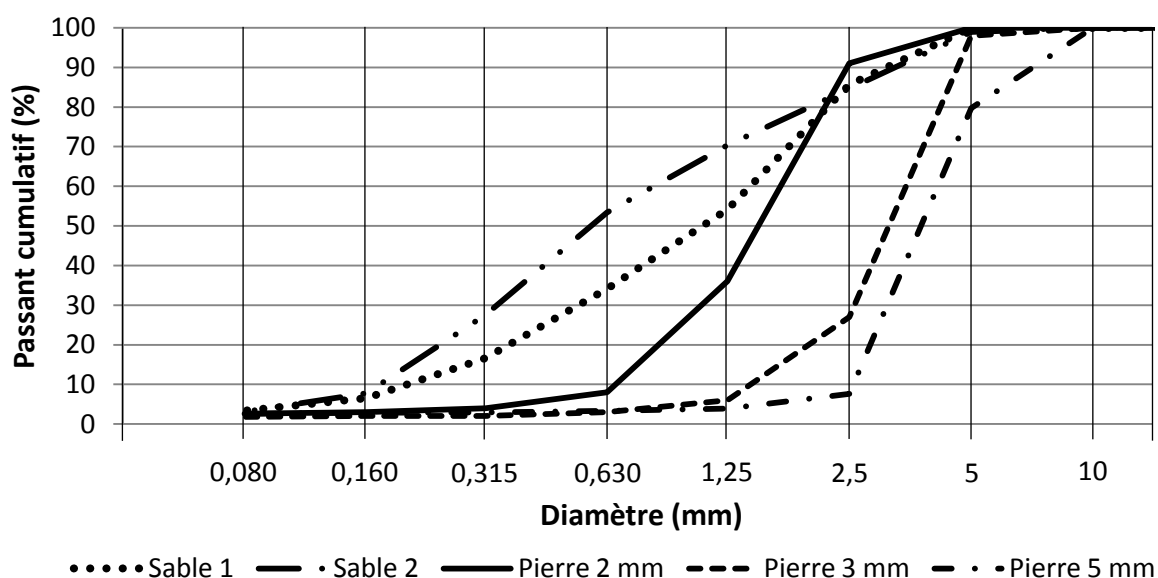


Figure 4.7 – Courbe granulométrique des granulats dans les bétons moulés à sec

Tableau 4.6 – Caractéristiques physiques des granulats pour bétons moulés à sec

Matériau	Densité brute	Densité sss	Densité apparente	Absorption
Sable 1	2,62	2,66	2,71	1,18 %
Sable 2	2,75	2,77	2,82	0,89 %
Pierre 2 mm	2,66	2,69	2,74	1,11 %
Pierre 3 mm	2,66	2,69	2,75	1,13 %
Pierre 5 mm	2,74	2,77	2,81	0,96 %

4.5 Adjuvants

4.5.1 Réducteur d'eau

Le réducteur d'eau utilisé lors de la fabrication des mélanges de BCR est le produit EUCON DX fabriqué par la compagnie Euclid Canada. Ce réducteur d'eau est une solution aqueuse constituée d'acides hydroxycarboxyliques et d'un catalyseur qui procure une meilleure hydratation du produit cimentaire. L'utilisation de ce produit permet d'améliorer la maniabilité du béton, de réduire la quantité d'eau dans le mélange et d'augmenter la résistance à la compression du béton. Le réducteur d'eau EUCON DX contient 28,5 % de matières solides, sa densité relative à 25 °C est de 1,150 et son pH est de 8,5. Le dosage recommandé se situe entre 150 et 250 ml/100kg de produit cimentaire.

4.5.2 Agent entraîneur d'air

L'agent entraîneur d'air utilisé lors de la fabrication des mélanges de BCR est le produit AIREX-L fabriqué par la compagnie Euclid Canada. Cet agent entraîneur d'air est une solution liquide d'hydrocarbures qui permet de produire un réseau stable de bulles d'air dans le béton. L'utilisation de ce produit permet d'améliorer la maniabilité et la durabilité du béton. L'agent entraîneur d'air AIREX-L contient 5,0 % de matières solides, sa densité relative à 25 °C est de 1,007 et son pH est de 7,5. Le dosage recommandé dans les BCR se situe entre 300 et 500 ml/100kg de produit cimentaire.

4.5.3 Contrôleur d'efflorescence

Les mélanges de pavés fabriqués à l'usine Permacon de Metcalfe contiennent le produit OPTEC EC-933 fabriqué par la compagnie GRACE. Ce produit permet d'améliorer l'ouvrabilité des bétons ayant un affaissement faible ou nul, la qualité de surface du produit fini, l'hydratation du ciment et les résistances mécaniques. Cet adjuvant permet notamment de réduire l'efflorescence dans les éléments de maçonnerie. La densité du produit se situe entre 1,025 et 1,046 et son pH entre 8,0 et 10,0. Le dosage recommandé est de 260 à 780 ml/kg de produit cimentaire.

5. FORMULATION DES MÉLANGES DE BÉTON

5.1 Bétons compactés au rouleau et bétons compactés à la paveuse

5.1.1 Optimisation granulaire

Afin d'obtenir un squelette granulaire ayant une compacité maximale, les quantités de pierre et de sable ont été optimisées afin d'obtenir un fuseau granulaire semblable à celui obtenu à l'aide de la formule Fuller-Thompson (voir équation 2.1). Le même squelette granulaire a été utilisé dans tous les mélanges de BCR et de BCP fabriqués dans ce projet. La figure 5.1 montre la courbe granulaire du combiné du sable, de la pierre 5-10, 5-14, et 10-20 mm, en comparaison à la courbe Fuller-Thompson.

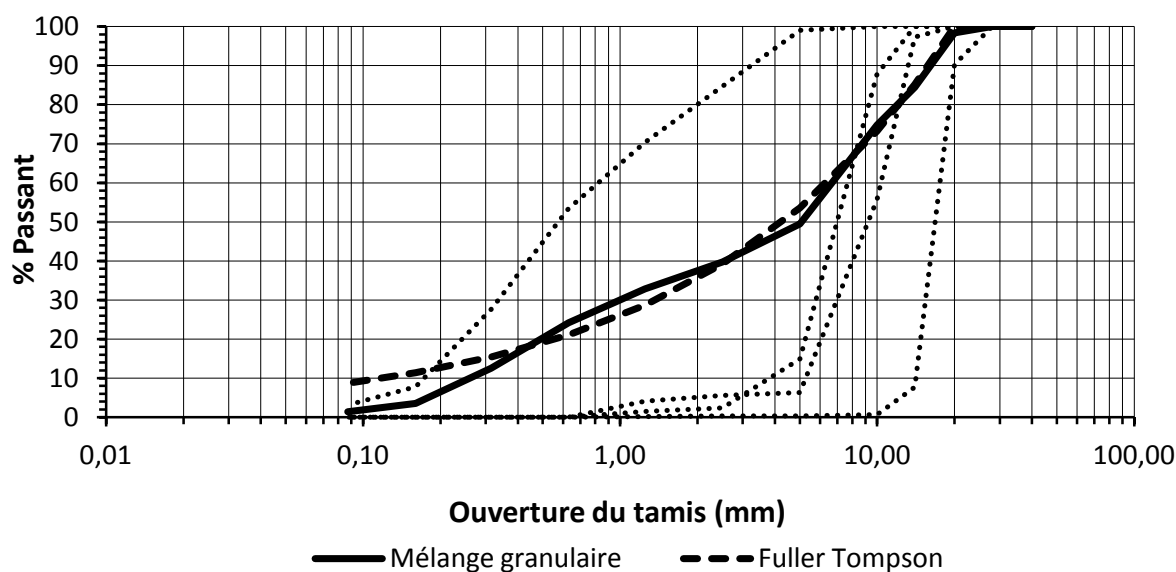


Figure 5.1 – Optimisation granulaire des mélanges de BCR et de BCP

5.1.2 Détermination du volume de pâte

Le volume de pâte et d'air a été déterminé à l'aide de l'abaque présenté à la figure 5.2, pour obtenir la maniabilité voulue. Dans ce projet, le volume de pâte et d'air a été fixé à 216 l/m³ pour les BCR et à 230 l/m³ pour les BCP, ce qui correspond approximativement à un temps Vebe de 25 et 40 secondes.

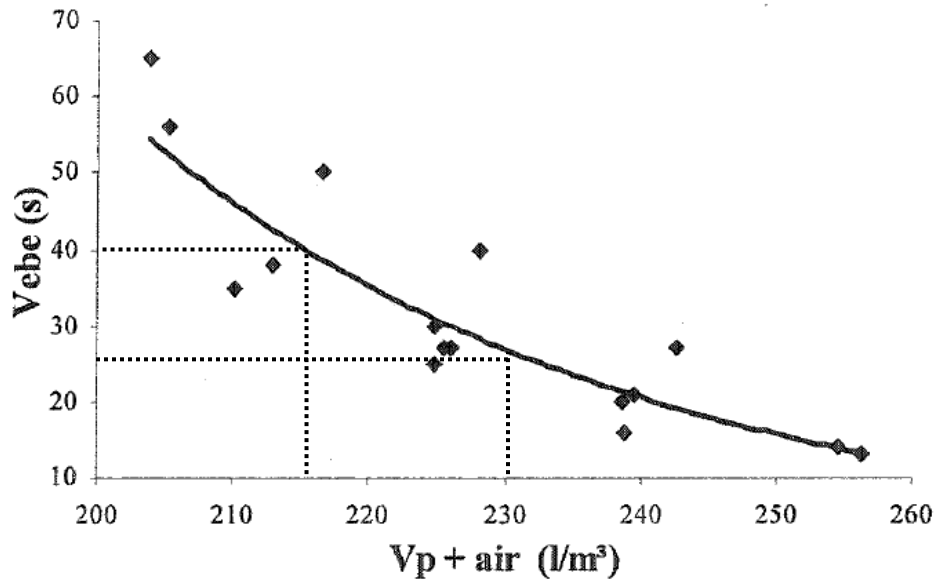


Figure 5.2 – Relation entre le volume de pâte et le temps Vebe
[Houehanou, 2004]

5.1.3 Remplacement cimentaire

Mélanges avec poudre de verre

Dans les mélanges de BCR et de BCP, la poudre de verre est utilisée en remplacement massique du ciment, tout en conservant un volume de pâte total constant. Les taux de remplacement du ciment par la poudre de verre (masse/masse) sont de 10, 15, 20 et 25 %. Bien que la densité de la poudre de verre diffère de celle du ciment, les quantités de ciment de poudre de verre et d'eau sont ajustées pour obtenir le même volume de pâte dans chaque mélange de BCR et de BCP. Le rapport eau-liant (masse eau / (masse ciment + masse poudre de verre)) est constant dans chaque mélange de BCR et de BCP. Le volume de liant (ciment + P.V.) varie donc en fonction du taux de remplacement cimentaire.

Mélanges avec poussières de pierre calcaire

Dans les mélanges de BCR et de BCP, les poussières de pierre calcaire sont utilisées en remplacement volumique du ciment. Les taux de remplacement du ciment par les poussières de pierre calcaire sont de 10 et 15 %. Le volume de pâte est maintenu constant dans les mélanges de BCR et de BCP. La même quantité d'eau est utilisée dans les mélanges contenant

des poussières de pierre calcaire que dans les mélanges de référence. Le rapport E/C effectif varie donc en fonction du taux de remplacement du ciment.

Mélanges avec poussières de béton concassé

Dans les mélanges de BCR et de BCP, les poussières de béton concassé sont utilisées en remplacement partiel du ciment et du sable. La distribution granulaire des mélanges est ajustée afin de s'ajuster à celle des mélanges de référence. Dans ces mélanges, 10 et 15 % du volume du ciment et une partie du sable sont remplacés par les poussières de béton concassé. La même quantité d'eau est utilisée dans les mélanges contenant les poussières de béton concassé que dans les mélanges de référence. Le rapport E/C effectif varie donc en fonction du taux de remplacement du ciment.

5.1.4 Nomenclature et composition des mélanges

L'identification des mélanges de BCR et de BCP est attribuée de la façon suivante :

Le premier chiffre indique le rapport E/L utilisé : 32 ou 37 (0,32 pour les BCR et 0,37 pour les BCP)

Pour les mélanges de référence, les lettres indiquent le type de liant utilisé :

REFGU : mélange de référence avec ciment GU

REFSF : mélange de référence avec ciment GUB-SF

Pour les mélanges avec ajouts cimentaires alternatifs, les lettres indiquent l'ajout utilisé et le second chiffre, le pourcentage de remplacement cimentaire :

PV : poudre de verre

PPC : poussières de pierre calcaire

PBC : poussières de béton concassé

La composition détaillée des BCR et BCP avec poudre de verre est présentée au tableau 5.1.

Le tableau 5.2 présente la composition des mélanges avec poussières de pierre calcaire et le tableau 5.3, celle des mélanges avec poussières de béton concassé.

Tableau 5.1 – Composition des BCR et BCP avec poudre de verre (PV)

	Mélange	Eau (kg/m³)	Ciment (kg/m³)	P.V. (kg/m³)	Sable (kg/m³)	P.10mm (kg/m³)	P.14mm (kg/m³)	P. 20 mm (kg/m³)	A.E.A. (ml)	R.E.. (ml/100kg·c)
BCR	32REFGU	88	276	0	901	560	363	298	1124	250
	32REFSF	88	276	0	901	560	363	298	1200	250
	32PV10	87	245	27	901	560	363	298	1124	250
	32PV15	87	230	41	901	560	363	298	1124	250
	32PV20	86	215	54	901	560	363	298	1124	250
	32PV25	86	201	67	901	560	363	298	1200	250
BCP	37REFGU	102	276	0	885	550	357	292	1050	250
	37REFSF	102	276	0	885	550	357	292	1500	250
	37PV10	101	246	27	885	550	357	292	1000	250
	37PV15	101	231	41	911	546	278	349	1100	250
	37PV20	100	216	54	906	546	283	349	1100	250
	37PV25	99	201	67	906	546	283	348	1200	250

Tableau 5.2 – Composition des BCR et BCP avec poussières de pierre calcaire (PPC)

	Mélange	Eau (kg/m³)	Ciment (kg/m³)	PPC (kg/m³)	Sable (kg/m³)	P.10mm (kg/m³)	P.14mm (kg/m³)	P. 20 mm (kg/m³)	A.E.A. (ml)	R.E.. (ml/100kg·c)
BCR	32REFGU	88	276	0	901	560	363	298	1124	250
	32REFSF	88	276	0	901	560	363	298	1200	250
	32PPC10	88	248	22	922	556	288	355	1124	250
	32PPC15	88	234	32	922	556	288	355	1200	250
BCP	37REFGU	102	276	0	885	550	357	292	1050	250
	37REFSF	102	276	0	885	550	357	292	1500	250
	37PPC10	104	244	21	906	546	283	349	1200	250
	37PPC15	104	230	32	906	546	283	349	1200	250

Tableau 5.3 – Composition des BCR et BCP avec poussières de béton concassé (PBC)

	Mélange	Eau (kg/m³)	Ciment (kg/m³)	PBC (kg/m³)	Sable (kg/m³)	P.10mm (kg/m³)	P.14mm (kg/m³)	P. 20 mm (kg/m³)	A.E.A. (ml)	R.E.. (ml/100kg·c)
BCR	32REFGU	88	276	0	901	560	363	298	1124	250
	32REFSF	88	276	0	901	560	363	298	1200	250
	32PBC10	88	248	41	897	556	290	353	1200	250
	32PBC15	88	234	62	884	556	290	353	1300	250
BCP	37REFGU	102	276	0	885	550	357	292	1050	250
	37REFSF	102	276	0	885	550	357	292	1500	250
	37PBC10	102	248	41	880	546	283	349	1050	250
	37PBC15	102	235	62	867	546	283	349	1100	250

5.2 Bétons moulés à sec en usine

5.2.1 Blocs de maçonnerie

Dans les blocs de maçonnerie fabriqués en usine, la poudre de verre est utilisée en remplacement massique du filler et du ciment. Le mélange de référence ne contient pas de poudre de verre, mais du filler calcaire. Les taux de remplacement du ciment et du filler calcaire par la poudre de verre ($PV/(C+F+PV)$) sont de 10, 15, 20, 25 et 30 %. La masse cumulative de ciment, de filler et de poudre de verre ($C+F+PV$) est égale à 185 kg dans tous les mélanges fabriqués. La composition des gâchées de chaque mélange est présentée au tableau 5.4.

Tableau 5.4 – Composition des blocs de maçonnerie

Mélange	Ciment GU (kg)	Filler (kg)	PV (kg)	C+F+PV (kg)	$PV/(C+F+PV)$ (%)	Eau (éq. ½ L)
REF	165,00	20,00	0,00	185,00	0	n,d,
10V	166,50	0,00	18,50	185,00	10	115
15V	157,25	0,00	27,75	185,00	15	116
20V	148,00	0,00	37,00	185,00	20	123
25V	138,75	0,00	46,25	185,00	25	107
30V	129,50	0,00	55,50	185,00	30	109

5.2.2 Pavés

Dans les pavés fabriqués en usine, la poudre de verre est utilisée en remplacement massique du ciment GU PR. Ces taux de remplacement sont de 15, 20, 25 et 30 %. Aucun pigment n'a été utilisé afin d'observer l'influence de la poudre de verre sur la couleur du produit fini. La composition des mélanges est présentée au tableau 5.5.

Tableau 5.5 – Composition des pavés

Mélange	Ciment (kg/m³)	PV (kg/m³)	P. 5 mm (kg/m³)	P. 3 mm (kg/m³)	P. 2 mm (kg/m³)	Sable (kg/m³)	Adjuvant (L)
REF	460	0	568	255	157	980	2,30
15V	391	69	568	255	157	980	2,30
20V	368	92	568	255	157	980	2,30
25V	345	115	568	255	157	980	2,30
30V	322	138	568	255	157	980	2,30

5.3 Bétons moulés à sec en laboratoire

5.3.1 Optimisation granulaire

La courbe granulaire des mélanges de bétons moulés à sec en laboratoire est basée sur celle des pavés fabriqués en usine. Pour obtenir la courbe granulométrique totale du mélange de référence, les dosages de sable, de pierre 2 mm, 3 mm, 5 mm et de ciment présentés au tableau 5.5 sont utilisés. La combinaison de ces matériaux permet d'obtenir la courbe granulométrique présentée à la figure 5.3. Sur cette figure, il est possible d'observer que la distribution du squelette granulaire du mélange se rapproche de la courbe théorique Fuller-Thompson.

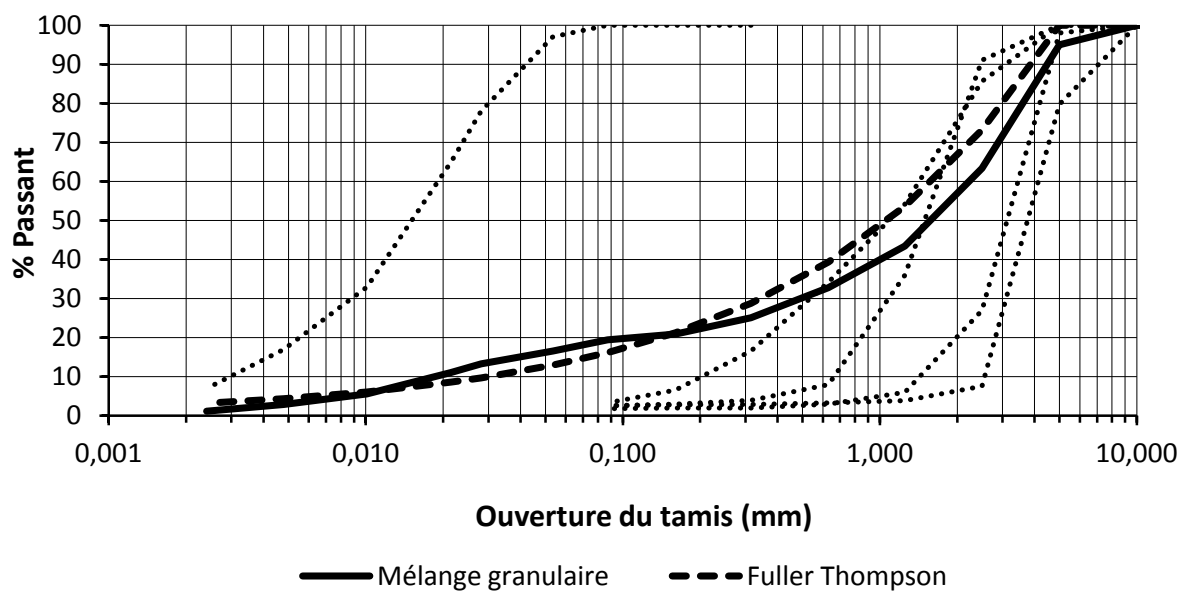


Figure 5.3 – Courbe granulométrique des bétons moulés à sec en laboratoire

5.3.2 Composition des mélanges avec poudre de verre

Les mêmes matériaux granulaires utilisés dans les mélanges de pavés fabriqués en usine sont utilisés dans les bétons moulés à sec au laboratoire, c'est-à-dire le sable et la pierre. Du ciment GUb-S est utilisé dans tous les mélanges, à l'exception du mélange de référence « REFSF » qui contient du ciment GUb-SF. Dans les mélanges fabriqués, 15, 20, 25 et 30 % du volume de ciment est remplacé par de la poudre de verre. La composition des mélanges fabriqués au laboratoire avec de la poudre de verre est donnée au tableau 5.6.

Tableau 5.6 – Composition des mélanges avec poudre de verre

Mélange	Eau (kg/m ³)	Ciment (kg/m ³)	P.V. (kg/m ³)	P. 5 mm (kg/m ³)	P. 3 mm (kg/m ³)	P. 2 mm (kg/m ³)	Sable (kg/m ³)
REF	144	460	0	567	253	157	977
REFSF	144	460	0	567	253	157	977
15V	144	391	56	567	253	157	977
20V	144	368	74	567	253	157	977
25V	144	345	93	567	253	157	977
30V	144	322	112	567	253	157	977

5.3.3 Composition des mélanges avec poussières de concassage

La pierre utilisée dans les mélanges avec poussières de concassage est la même que celle utilisée dans les mélanges de pavés fabriqués en usine. Le sable utilisé est le sable du laboratoire de béton de l'Université de Sherbrooke (voir section 4.4.2). Du ciment GUb-S est utilisé dans tous les mélanges, à l'exception du mélange de référence « REFSF-2 » qui contient du ciment GUb-SF. Les poussières de pierre calcaire et les poussières de béton concassé sont utilisées en remplacement du ciment et du sable. Dans ces mélanges, 10 et 15 % du volume de ciment a été remplacé par les poussières de concassage. Le volume total de poussières et de sable a été ajusté afin de respecter la courbe granulométrique présentée à la figure 5.3. La composition des mélanges est présentée au tableau 5.7 et au tableau 5.8.

Tableau 5.7 – Composition des mélanges avec poussières de pierre calcaire

Mélange	Eau (kg/m ³)	Ciment (kg/m ³)	PPC (kg/m ³)	P. 5 mm (kg/m ³)	P. 3 mm (kg/m ³)	P. 2 mm (kg/m ³)	Sable (kg/m ³)
REF-2	143	463	0	544	330	547	500
REFSF-2	143	463	0	544	330	547	500
10PPC	143	414	69	544	330	547	465
15PPC	143	393	103	544	330	547	447

Tableau 5.8 – Composition des mélanges avec poussières de béton recyclé

Mélange	Eau (kg/m ³)	Ciment (kg/m ³)	PBC (kg/m ³)	P. 5 mm (kg/m ³)	P. 3 mm (kg/m ³)	P. 2 mm (kg/m ³)	Sable (kg/m ³)
REF-2	143	463	0	544	330	547	500
REFSF-2	143	463	0	544	330	547	500
10PBC	143	414	71	544	330	547	456
15PBC	143	393	107	544	330	547	431

6. PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES

6.1 Malaxage

6.1.1 BCR et BCP

Les BCR et les BCP sont mélangés dans un malaxeur à cuve rotative horizontale d'une capacité de 100 litres (figure 6.1). La procédure suivante est utilisée pour le malaxage des bétons compactés au rouleau :

- Malaxer le sable pendant 30 secondes, prélever 500 g pour déterminer la teneur en eau et corriger la quantité de sable et d'eau.
- Si nécessaire, calculer la teneur en eau des poussières de concassage et ajuster les quantités de poussières et d'eau du mélange. Ajouter les poussières de concassage dans le malaxeur et malaxer pendant une minute supplémentaire.
- Ajouter la pierre et la moitié d'eau de gâchage, malaxer pendant une minute.
- Ajouter l'agent entraîneur d'air dilué dans 500 ml d'eau de gâchage et malaxer pendant 40 secondes.
- Ajouter le ciment et, si nécessaire, la poudre de verre, malaxer pendant 30 secondes.
- Sans arrêter le malaxeur, ajouter le réducteur d'eau dilué dans le reste d'eau de gâchage.
- Arrêter le malaxage 3 minutes après l'ajout du ciment.

6.1.2 Bétons moulés à sec

Les bétons moulés à sec en laboratoire sont mélangés dans un malaxeur à cuve rotative horizontale d'une capacité de 10 litres (figure 6.2). La procédure suivante est utilisée pour le malaxage de ces bétons :

- Malaxer le sable pendant 30 secondes, prélever 500 g pour déterminer la teneur en eau et corriger la quantité de sable et d'eau.
- Si nécessaire, calculer la teneur en eau des poussières de concassage et ajuster les quantités de poussières et d'eau du mélange. Ajouter les poussières de concassage dans le malaxeur et malaxer pendant une minute supplémentaire.
- Ajouter la pierre et la moitié d'eau de gâchage, malaxer pendant une minute.
- Ajouter le ciment et, si nécessaire, la poudre de verre, malaxer pendant 30 secondes.
- Arrêter le malaxage 3 minutes après l'ajout du ciment.



Figure 6.1 – Malaxeur à cuve rotative de 100 litres



Figure 6.2 – Malaxeur à cuve rotative de 10 litres.

6.2 Essais réalisés sur les BCR et BCP

6.2.1 Mesure de la maniabilité (temps Vebe)

La mesure de la maniabilité des mélanges est réalisée à l'aide de l'appareil Vebe illustré à la figure 6.3. Cet appareil consiste en une table vibrante (A), un récipient cylindrique (B) et une surcharge de 23,2 kg (C). L'essai est réalisé en conformité avec la norme ASTM C 1170. Lors de l'essai, une masse de 13,4 kg de béton frais est placée dans le récipient fixé à la table vibrante et la masse est déposée sur l'échantillon. La vibration est appliquée sur l'échantillon jusqu'à ce qu'un anneau de pâte de ciment se forme au tour de la base de la surcharge. Le temps Vebe est le temps écoulé entre le début de la vibration et la formation complète de l'anneau de pâte au tour de la base de la surcharge.

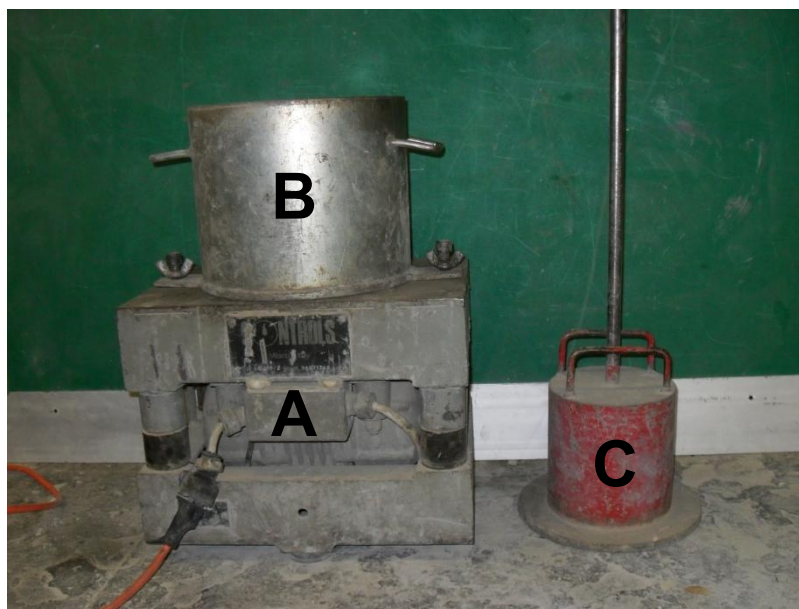


Figure 6.3 – Appareil Vebe

6.2.2 Masse volumique et teneur en air

La masse volumique est mesurée à l'aide du récipient d'un air-mètre. Le béton est consolidé dans le récipient à l'aide de la table vibrante de l'appareil Vebe et d'une surcharge de 17,3 kg, en trois couches de même épaisseur. Chaque couche est consolidée pour une durée égale au temps Vebe obtenu précédemment. Lorsque les trois couches sont consolidées, le béton est

arassé à la surface du récipient et la masse de béton est mesurée. La masse volumique du béton à l'état frais est obtenue en divisant la masse de l'échantillon par le volume du récipient.

La teneur en air est mesurée à l'aide d'un air-mètre à pression d'air, selon la norme ASTM C 231, à l'exception de la méthode de mise en place du béton dans le récipient. L'échantillon utilisé pour la mesure de la teneur en air est celui mis en place à l'aide de l'appareil Vebe pour la mesure de la masse volumique.

6.2.3 Cure des échantillons

Les échantillons de BCR et de BCP sont démoulés après une période de 24 ± 8 heures suivant le contact de l'eau avec le ciment. Les échantillons sont ensuite entreposés dans une chambre à température et humidité contrôlées. La température de la chambre de murissement est de 23 ± 2 °C et l'humidité relative est supérieure à 95 %, tel que spécifié dans la norme ASTM C 193. Les échantillons sont maintenus dans ces conditions jusqu'au moment de la réalisation des essais.

6.2.4 Résistance à la compression

Les éprouvettes utilisées pour mesurer la résistance à la compression sont consolidées à l'aide d'un marteau de type Kango (figure 6.4), en quatre couches de même épaisseur, selon la norme ASTM C 1435. Le béton est compacté dans des moules en plastiques de 150 x 300 mm placés dans un cylindre d'acier pour éviter les déformations du moule causées par les contraintes induites par le marteau compacteur. La partie amovible supérieure du cylindre d'acier permet de remplir suffisamment le moule lors de la mise en place de la quatrième couche de béton. Les mélanges de béton sont consolidés jusqu'à ce qu'un anneau de pâte se forme au tour de l'embout circulaire du marteau.

La résistance à la compression des BCR et des BCP est mesurée sur trois éprouvettes cylindriques de 150 x 300 mm, à un âge de 7, 28 et 91 jours. Les éprouvettes de béton sont coiffées à l'aide de souffre selon la norme ASTM C 617. Un taux de chargement de 0,15 à 0,35 MPa/s est ensuite appliqué sur les échantillons jusqu'à l'obtention de la charge maximale, en respect de la norme ASTM C 39.



Figure 6.4 – Moule de 150 x 300 mm, cylindre en acier et marteau de type Kango

La résistance à la compression (f'_c) est calculée en divisant la charge maximale (P_{\max}) mesurée par l'aire transversale moyenne de l'éprouvette (A) (voir équation 6.1). La résistance à la compression est exprimée en mégapascal (MPa), la force en newton (N) et l'aire en millimètres carrés (mm²). La contrainte obtenue est ensuite multipliée par un facteur de correction (f) permettant d'obtenir la résistance relative de l'éprouvette, en fonction de son élancement. L'élancement de l'éprouvette est obtenu en divisant la hauteur de l'éprouvette par son diamètre (l/d). Le facteur de correction est obtenu à l'aide de l'équation 6.2.

$$f'_c = \frac{P_{\max}}{A} \times f \quad \text{équation 6.1}$$

$$f = -0,1067 \times \left(\frac{l}{d}\right)^4 + 0,8 \times \left(\frac{l}{d}\right)^3 - 2,2333 \times \left(\frac{l}{d}\right)^2 + 2,83 \times \left(\frac{l}{d}\right) - 0,42 \quad \text{équation 6.2}$$

6.2.5 Résistance à la flexion

Les éprouvettes utilisées pour mesurer la résistance à la flexion sont consolidées à l'aide d'un marteau de type Kango, en deux couches de même épaisseur. Les mélanges de BCR sont consolidés pendant 45 secondes par couche, tandis que les mélanges de BCP sont consolidés pendant 30 secondes.

La résistance à la flexion des BCR et des BCP est mesurée sur deux éprouvettes prismatiques de 100 x 100 x 400 mm, à un âge de 7 et 28 jours. Les éprouvettes sont testées en flexion sur une presse hydraulique, selon un taux de chargement de 0,86 à 1,21 MPa/min, en respect de la norme ASTM C 78. Lorsque la rupture de l'échantillon se produit à l'intérieur du tiers médian de la portée de l'éprouvette, la résistance à la flexion est calculée à partir de l'équation 6.3. Dans le cas où la rupture se produit à l'extérieur du tiers médian, sans dépasser 5 % de la portée totale, l'équation 6.4 est utilisée.

$$M_r = \frac{PL}{bd^2} \quad \text{équation 6.3}$$

$$M_r = \frac{3Pa}{bd^2} \quad \text{équation 6.4}$$

où :

M_r : module de rupture (MPa)

P : charge maximale appliquée sur l'éprouvette (N)

L : Portée libre (mm)

b : largeur moyenne de l'éprouvette, mesurée à la rupture (mm)

d : profondeur moyenne de l'éprouvette, mesurée à la rupture (mm)

a : distance moyenne entre la ligne de fracture et l'appui le plus près, mesurée sur la face en tension de l'éprouvette (mm)

6.2.6 Pénétration des ions chlore

Les éprouvettes utilisées pour déterminer la pénétration des ions chlore sont fabriquées selon la méthode décrite à la section 6.2.4. Les éprouvettes sont ensuite carottées pour réduire leur diamètre à 100 mm. Des échantillons sont ensuite prélevés dans le bas, le centre et le haut des éprouvettes carottées. L'essai de pénétration des ions chlore est réalisé sur les mélanges de BCP, à un âge de 28, 56 et 91 jours, en respect de la norme ASTM C 1202.

L'essai de pénétration des ions chlore consiste à mesurer la quantité de courant électrique traversant une rondelle de béton d'une épaisseur de 50 mm, durant une période six heures. Une différence de potentiel de 60 V (courant continu) est maintenue au travers chaque côté de l'échantillon. Une face de l'échantillon est immergée dans une solution de chlorure de sodium (NaCl – 3,0 %) et l'autre dans une solution d'hydroxyde de sodium (NaOH – 0,3 N). La charge totale, exprimée en coulombs, est un indicateur du niveau de pénétration des ions chlores dans le béton. Le tableau 6.1 présente une classification qualitative de la pénétrabilité aux ions chlore du béton en fonction de la quantité de courant électrique traversant l'échantillon lors de l'essai. Cette classification est établie pour des bétons conventionnels, mais sera considérée, dans le cadre de ces travaux, applicable pour le BCR.

Tableau 6.1 – Pénétration des ions chlore
[tiré de la norme ASTM C 1202]

Charge (coulombs)	Pénétrabilité aux ions chlore
> 4 000	Haute
2 000 – 4 000	Modérée
1 000 – 2 000	Basse
100 – 1 000	Très basse
< 100	Négligeable

6.3 Essais réalisés sur les éléments en bétons moulés à sec en usine

6.3.1 Cure des blocs de maçonnerie

Les blocs ont été curés à la chaleur en usine durant 48 heures avant d'être livrés au laboratoire de l'Université de Sherbrooke. Les blocs ont ensuite été conservés à l'air libre, dans des conditions ambiantes jusqu'à la réalisation des essais.

6.3.2 Absorption et masse volumique des blocs de maçonnerie

L'absorption et la masse volumique des blocs de maçonnerie sont mesurées lorsque les éléments de maçonnerie ont atteint un âge de 28 jours, selon la norme ASTM C 140. Ces tests sont réalisés sur des éléments complets. La masse dans l'eau (g), la masse saturée (g) et la masse sèche (g) sont déterminées de la façon suivante :

Masse dans l'eau (W_i) : l'élément de maçonnerie est immergé dans l'eau pour une période de 24 heures. Après cette période de saturation, l'élément suspendu sur un fil d'acier est pesé dans l'eau.

Masse saturée (W_s) : Après être pesé dans l'eau, l'élément est déposé sur un grillage métallique pendant environ une minute pour lui permettre de se drainer. L'élément est ensuite essuyé à l'aide d'un linge humide et pesé.

Masse sèche (W_d) : L'élément est séché jusqu'à masse constante dans une étuve à une température de 100 à 115 °C, pour une période d'au moins 24 heures.

L'absorption peut être exprimée en kg/m^3 (équation 6.5) ou en pourcentage de la masse de l'élément (équation 6.6).

$$\text{Absorption (kg/m}^3\text{)} = \left(\frac{W_s - W_d}{W_s - W_i} \right) \times 1000 \quad \text{équation 6.5}$$

$$\text{Absorption (\%)} = \left(\frac{W_s - W_d}{W_d} \right) \times 100 \quad \text{équation 6.6}$$

La masse volumique (D) des éléments de maçonnerie, exprimée en kg/m^3 , est obtenue à l'aide de l'équation 6.7.

$$\text{Masse volumique (kg/m}^3\text{)} = \left(\frac{W_d}{W_s - W_i} \right) \times 1000 \quad \text{équation 6.7}$$

6.3.3 Résistance à la compression des blocs de maçonnerie

La résistance à la compression des blocs de maçonnerie est mesurée après 3, 7, 14, 28 et 56 jours, en conformité avec la norme ASTM C 140. Les tests sont réalisés sur des blocs complets coiffés de panneaux souples en fibre de bois, pour permettre une répartition uniforme de la charge sur l'aire totale de l'élément. Lors de l'essai de résistance à la compression, la moitié de la charge anticipée est appliquée sur l'élément de maçonnerie. Ensuite, la charge maximale doit être atteinte dans un intervalle de temps d'au moins une minute, sans toutefois dépasser deux minutes.

La résistance à la compression des blocs de maçonnerie peut être exprimée en fonction de l'aire nette (A_n) ou de l'aire brute (A_g). La résistance à la compression selon l'aire nette est obtenue en divisant la charge maximale par l'aire moyenne transversale de l'élément (voir équation 6.8). L'aire nette est obtenue à l'aide de l'équation 6.9 et de l'équation 6.10.

$$f'c \text{ selon l'aire nette (MPa)} = \frac{P_{\max}}{A_n} \quad \text{équation 6.8}$$

$$V_n = \frac{W_d}{D} \quad \text{équation 6.9}$$

$$A_n = \frac{V_n}{H} \quad \text{équation 6.10}$$

où :

P_{\max} : charge de compression maximale (N)

A_n : aire moyenne de l'échantillon (mm^2)

V_n : volume net de l'échantillon (mm^3)

W_d : masse sèche de l'échantillon (kg) (voir section 6.3.2)

D : masse volumique de l'échantillon (kg/m^3) (voir section 6.3.2)

H : hauteur moyenne de l'échantillon (mm)

La résistance à la compression selon l'aire brute est obtenue en divisant la charge maximale par l'aire brute de l'élément (voir équation 6.11). L'aire brute est obtenue en multipliant la longueur moyenne de l'élément par la largeur moyenne de l'élément (voir équation 6.12).

$$f'c \text{ selon l'aire brute (MPa)} = \frac{P_{\max}}{A_g} \quad \text{équation 6.11}$$

$$A_g = L \times W \quad \text{équation 6.12}$$

où :

P_{\max} : charge de compression maximale (N)

A_g : aire brute de l'échantillon (mm^2)

L : longueur moyenne de l'échantillon (mm)

W : largeur moyenne de l'échantillon (mm)

6.3.4 Cure des pavés

Immédiatement après leur fabrication, les pavés ont été entreposés dans la chambre de murissement de l'usine Permacon de Metcalfe. Après leur livraison, ils ont été entreposés dans la chambre de murissement du laboratoire de l'Université de Sherbrooke, à une humidité relative de 100 % et une température de 23 °C, jusqu'à un âge de 14 jours. Après 14 jours, les pavés ont séjourné dans une salle à une température de 23 °C et à une humidité relative de 50 %, jusqu'à la réalisation des essais, tel que prescrit par la norme CSA A231.2 - 06.

6.3.5 Absorption et masse volumique des pavés

L'absorption et la masse des pavés sont déterminées selon la procédure présentée à la section 6.3.2, à un âge de 28 jours.

6.3.6 Résistance à la compression des pavés

En conformité avec la norme CSA A231.2 – 06, la résistance à la compression des pavés est mesurée sur des cubes sciés, de dimensions égales à l'épaisseur nominale des pavés, soit 80 mm de côté. Les cubes sont coiffés à l'aide de soufre et sont testés en compression selon un taux de chargement entre 0,15 et 0,35 MPa/s. Pour chaque mélange, deux cubes sont prélevés dans trois lots, soit le début, le milieu et la fin de la production. Six cubes sont donc testés pour chaque mélange, 28 et 91 jours après la fabrication des pavés. La résistance à la compression est obtenue en divisant la charge maximale par l'aire moyenne de l'échantillon.

6.3.7 Résistance à l'écaillage des pavés

Les essais d'écaillage ont été réalisés en conformité avec la norme CSA A231.2 – 06 et mesurés sur trois échantillons de chaque mélange. Après 28 jours de cure, les échantillons sont placés individuellement dans des récipients en plastique fermés et immergés dans une solution à 3 % de NaCl durant 24 heures. Après la période de saturation, les échantillons sont exposés à des cycles répétés de gel-dégel, selon une fréquence d'un cycle par jour. Après 7, 28 et 49 cycles de gel-dégel, les échantillons sont lavés délicatement à l'aide d'un jet d'eau afin de récupérer les résidus d'écaillage. Les résidus sont récupérés sur un tamis de 80 µm puis séchés et pesés. La perte de masse cumulative des pavés est exprimée en fonction de la surface totale de l'échantillon (g/m²).

6.4 Essais réalisés sur les bétons moulés à sec en laboratoire

6.4.1 Fabrication des échantillons

Les échantillons de bétons sont moulés à sec en laboratoire à l'aide de l'appareil à cisaillement giratoire illustré à la figure 6.5. L'appareil utilisé est un « Intensive Compaction Tester » de type ICT-100R. La méthode utilisée pour la fabrication des éprouvettes est inspirée de la méthode d'essai finlandaise « Nordtest Method NT BUILD 427 (1994) ». Les paramètres suivants sont utilisés pour la fabrication des éprouvettes cylindriques d'un diamètre de 100 mm et d'une hauteur approximative de 100 mm :

- Angle de giration : 40 mrad (2,29°)
- Vitesse de rotation : 60 cycles/minute
- Pression : 160 kPa
- Nombre de cycles : 80



Figure 6.5 – Appareil à cisaillement giratoire (ICT-100R)

Pour réaliser l'essai, une masse prédéterminée de béton est placée dans la cellule cylindrique de 100 mm de diamètre, fermée à l'aide de deux plaques d'acier amovibles à chaque extrémité. La précision de l'appareil est optimale lorsque la hauteur finale compactée de l'échantillon est de 100 ± 10 mm. Dans le cadre de ces travaux, une quantité de 2000 g est

utilisée pour atteindre cette exigence. Une fois remplie, la cellule est placée sous le piston du compacteur giratoire. Durant l'essai, le piston applique une force axiale constante sur l'échantillon et la base de l'appareil tourne selon un axe décentré. Lors du travail de l'appareil, les plaques au dessus et au dessous de l'échantillon demeurent parallèles, tandis que l'angle entre les plaques et la cellule varie constamment durant le mouvement circulaire de la presse. Une représentation exagérée du mouvement de la presse est montrée à la figure 6.6. Lors de la fabrication des échantillons, l'appareil à cisaillement giratoire permet de mesurer la masse volumique et le cisaillement interne de l'échantillon de béton en fonction du nombre de cycles de compactage. Les valeurs mesurées sont affichées en temps réel sur un ordinateur et sont enregistrées sous forme d'un fichier texte.

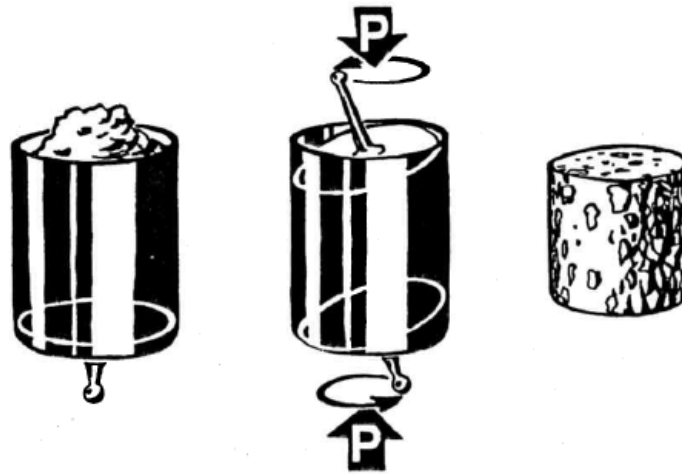


Figure 6.6 – Cinétique de compaction de l'ICT
[Juvas, 1990]

Puisque le diamètre de la cellule demeure constant, la masse volumique du béton est calculée en fonction de la hauteur de l'échantillon selon l'équation 6.13.

$$M.V. = \frac{m}{\left(\frac{\pi D^2}{4}\right) \times h} \times 10^6 \quad \text{équation 6.13}$$

où :

M.V. : masse volumique de l'échantillon (kg/m³)

m : masse de l'échantillon (g)

D : diamètre de la cellule (mm)

h : hauteur de l'échantillon (mm)

La contrainte de cisaillement (S) est obtenue en divisant le moment de force qu'applique l'appareil par le volume de l'échantillon (voir équation 6.14). Le cisaillement mesuré doit être multiplié par 2, car la réaction n'est mesurée qu'à une extrémité de l'échantillon. Une réaction de grandeur égale et de direction opposée au moment mesurée se produit à l'autre extrémité de l'échantillon.

$$S = 2 \times \frac{M}{\left(\frac{\pi D^2}{4}\right) \times h} \times 10^6 \quad \text{équation 6.14}$$

où :

S : contrainte de cisaillement dans l'échantillon (kN/m²)

M : moment de force appliqué par l'appareil (N·m)

D : diamètre de l'échantillon (mm)

h : hauteur de l'échantillon (mm)

Avec les données recueillies à l'aide de l'ICT, il est possible de calculer le travail nécessaire pour compacter les échantillons, en fonction du nombre de cycles. Le travail effectué est divisé par la masse de l'échantillon afin d'exprimer l'énergie de compaction par unité de masse (kJ/kg). L'équation 6.15 est utilisée pour calculer le travail.

$$\frac{W}{m} = \frac{4\pi\alpha}{m} \sum_0^N V_i \times S_i \quad \text{équation 6.15}$$

où :

W : travail (kJ)

m : masse de l'échantillon (kg)

α : angle de giration (rad)

N : nombre de cycles de compaction

V_i : volume de l'échantillon au cycle i (m³)

S_i : contrainte de cisaillement au cycle i (kN/m²)

6.4.2 Cure des échantillons

Les échantillons sont entreposés dans une chambre de murissement à une humidité relative de 100 % et une température de 23 °C, jusqu'à un âge de 14 jours. Ensuite, les échantillons sont placés dans une salle à une température de 23 °C et à une humidité relative de 50 %, jusqu'à la réalisation des essais, tel que prescrit par la norme CSA A231.2 – 06.

6.4.3 Masse volumique et absorption

L'absorption et la masse des bétons moulés à sec en laboratoire sont déterminées selon la procédure présentée à la section 6.3.2, à un âge de 28 jours.

6.4.4 Résistance à la compression

Pour chaque mélange, deux éprouvettes sont testées en compression à un âge de 28 et 91 jours. Les éprouvettes de béton sont coiffées à l'aide de soufre et testées sur une presse hydraulique à un taux de chargement se situant entre 0,15 et 0,35 MPa/s. Aucun facteur n'est utilisé pour corriger l'élancement des éprouvettes. La résistance à la compression est obtenue en divisant la charge maximale par l'aire moyenne de l'échantillon et est exprimée en MPa.

6.4.5 Résistance à la traction par fendage

Le test de traction indirecte (essai brésilien) est réalisé sur deux éprouvettes de chaque mélange, à un âge de 28 jours, selon la norme ASTM C 496. L'échantillon cylindrique est placé horizontalement sur le plateau d'une presse hydraulique, entre deux minces bandes de bois. Le taux de chargement lors de l'essai se situe entre 0,7 et 1,4 MPa/minute. L'équation 6.16 est utilisée pour déterminer la résistance à la traction du béton.

$$f_{sp} = \frac{2P}{\pi ld} \quad \text{équation 6.16}$$

où :

f_{sp} : résistance à la traction par fendage (MPa)

P : charge maximale appliquée sur l'éprouvette (N)

l : longueur moyenne de l'éprouvette (mm)

d : diamètre moyen de l'éprouvette (mm)

7. PRÉSENTATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS

7.1 BCR et BCP

Cette section du chapitre présente les résultats obtenus sur les mélanges de BCR et de BCP fabriqués en laboratoire. Les mélanges testés contiennent de la poudre de verre, des poussières de pierre calcaire et des poussières de béton concassé. Les propriétés mesurées sont la masse volumique, la teneur en air, la maniabilité Vebe, la résistance à la compression et la résistance à la flexion. La pénétration des ions chlores est mesurée sur les mélanges de BCP de référence et les mélanges contenant 15 et 25 % de poudre de verre.

7.1.1 Masse volumique et teneur en air

La masse volumique et la teneur en air des BCR et des BCP avec poudre de verre (PV) sont présentées au tableau 7.1, celles des mélanges avec poussières de pierre calcaire (PPC) au tableau 7.2 et celles des mélanges avec poussières de béton concassé (PBC) au tableau 7.3.

Tableau 7.1 – Propriétés à l'état frais des BCR et BCP avec PV

Mélange	Temps Vebe (s)	Masse volumique (kg/m ³)	Teneur en air (%)	AEA (ml)
32REFGU	48	2430	3,6	1124
32REFSF	40	2420	2,7	1200
32PV10	45	2460	4,5	1050
32PV15	44	2440	3,5	1100
32PV20	49	2410	3,3	1124
32PV25	44	2380	4,1	1200
37REFGU	24	2430	4,2	1050
37REFSF	25	2430	5,0	1500
37PV10	17	2460	3,7	1000
37PV15	21	2430	4,3	1100
37PV20	25	2460	4,0	1100
37PV25	19	2420	4,2	1200

Tableau 7.2 – Propriétés à l'état frais des BCR et BCP avec PPC

Mélange	Temps Vebe (s)	Masse volumique (kg/m ³)	Teneur en air (%)	AEA (ml)
32REFGU	48	2430	3,6	1124
32REFSF	40	2420	2,7	1200
32PPC10	60	2450	3,5	1124
32PPC15	63	2440	3,0	1200
37REFGU	24	2430	4,2	1050
37REFSF	25	2430	5,0	1500
37PPC10	20	2400	4,3	1200
37PPC15	24	2400	5,0	1200

Tableau 7.3 – Propriétés à l'état frais des BCR et BCP avec PBC

Mélange	Temps Vebe (s)	Masse volumique (kg/m ³)	Teneur en air (%)	AEA (ml)
32REFGU	48	2430	3,6	1124
32REFSF	40	2420	2,7	1200
32PBC10	43	2480	3,7	1200
32PBC15	38	2450	3,5	1300
37REFGU	24	2430	4,2	1050
37REFSF	25	2430	5,0	1500
37PBC10	18	2460	5,0	1050
37PBC15	28	2460	4,0	1100

Selon les résultats obtenus en laboratoire, l'ajout de poudre de verre, de poussières de pierre calcaire ou de poussières de béton concassé dans les BCR et les BCP a peu d'effet sur la masse volumique du béton frais.

Une quantité plus importante d'agent entraîneur d'air est nécessaire pour permettre l'entraînement d'air dans les BCR et les BCP avec fumée de silice, étant donné la surface spécifique importante de ce matériau. Une légère augmentation d'agent entraîneur d'air est nécessaire lorsque la quantité de poudre de verre augmente dans le mélange. Les poussières de concassage n'ont pas d'effet significatif sur l'entraînement d'air.

7.1.2 Mesure de la maniabilité (temps Vebe)

Le temps Vebe, exprimé en secondes, est utilisé pour comparer la maniabilité des différents mélanges de BCR et de BCP fabriqués au laboratoire. Le temps Vebe des bétons contenant de la poudre de verre est montré à la figure 7.1, celui des bétons contenant des poussières de pierre calcaire est montré à la figure 7.2 et celui des mélanges contenant des poussières de béton concassé est montré à la figure 7.3. Les mélanges de BCR ont toujours un temps Vebe supérieur à celui des BCP, puisque ces derniers contiennent un volume d'eau supérieur (plus grand volume de pâte) qui permet une meilleure lubrification entre les particules du mélange. Les mélanges de référence sont formulés pour obtenir un temps Vebe d'environ 40 secondes pour les BCR et d'environ 25 secondes pour les BCP.

Influence de la fumée de silice sur la maniabilité

Tant dans les mélanges de BCR que dans les mélanges de BCP, la fumée de silice ne semble pas avoir d'influence significative sur la maniabilité du béton. Dans les BCR, le temps Vebe du mélange de référence avec ciment GU est de 48 secondes et celui du mélange avec fumée de silice est de 40 secondes (diminution de 18 %). La variabilité de l'essai Vebe est toutefois relativement grande, puisque le moment exact où se forme l'anneau de pâte (moment qui détermine le temps Vebe) dépend de l'interprétation de l'utilisateur. Cette variabilité est encore plus marquée pour des mélanges très secs et les mélanges avec un faible volume de pâte. Une variation de plus ou moins 20 % du temps Vebe d'un même mélange peut être jugée acceptable.

Dans les BCP, le temps Vebe du mélange avec ciment GU est de 24 secondes et celui du mélange avec fumée de silice est de 25 secondes. Le faible écart entre ces mesures démontre l'influence négligeable de la fumée de silice sur la maniabilité des mélanges de BCP.

Influence de la poudre de verre sur la maniabilité

La maniabilité des mélanges de BCR avec poudre de verre est similaire à celle des mélanges de référence. Le temps Vebe des mélanges avec poudre de verre est respectivement de 45, 44, 49, 44 secondes pour des taux de remplacement de 10, 15, 20 et 25 %. Ces mélanges ont donc

une maniabilité similaire au mélange de référence avec ciment GU (48 sec.) et légèrement inférieure au mélange avec fumée de silice (40 sec.).

La maniabilité des mélanges de BCP avec poudre de verre est légèrement supérieure ou égale aux mélanges de référence. Pour des taux de remplacement de 10, 15, 20 et 25 %, le temps Vebe des mélanges avec poudre de verre est de 17, 21, 25 et 19 secondes, comparativement à 24 et 25 secondes pour le mélange de référence avec ciment GU et le mélange avec fumée de silice.

Les résultats de la mesure de la maniabilité des BCR et BCP avec poudre de verre sont illustrés à la figure 7.1.

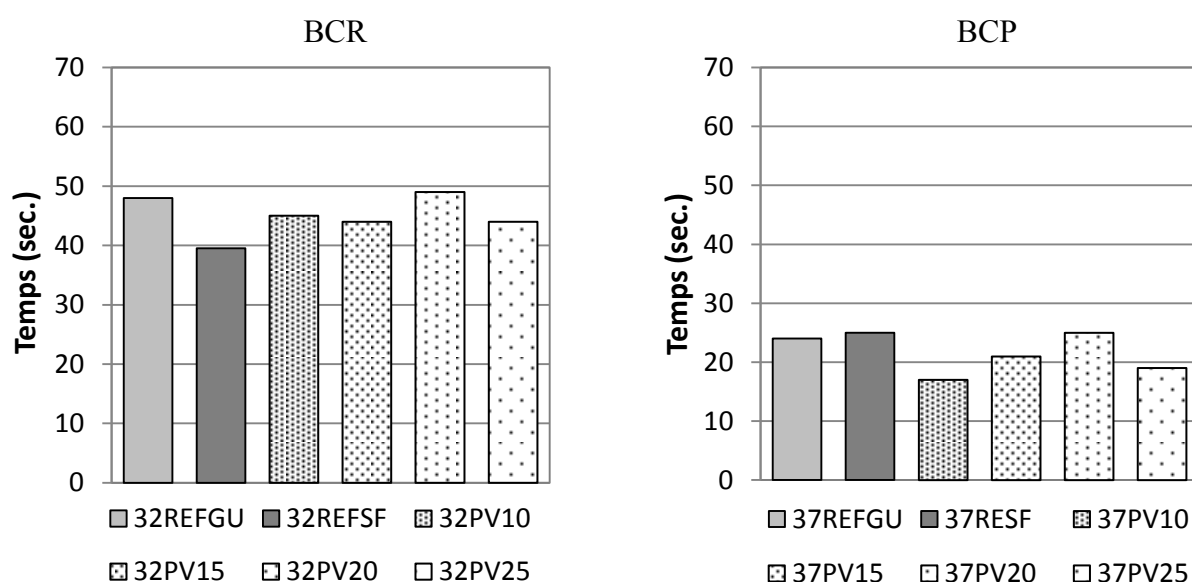


Figure 7.1 – Maniabilité des BCR et des BCP avec poudre de verre

Influence des poussières de pierre calcaire sur la maniabilité

Les mélanges de BCR avec poussières de pierre calcaire ont une maniabilité légèrement inférieure à celle des mélanges de référence. Le temps Vebe des mélanges avec 10 et 15 % de poussières de pierre calcaire en remplacement cimentaire est de 60 et 63 secondes, comparativement à 48 et 40 secondes pour le mélange de référence avec ciment GU et le mélange avec fumée de silice.

La maniabilité des mélanges de BCP avec poussières de pierre calcaire est légèrement supérieure ou égale aux mélanges de référence. Le temps Vebe des mélanges fabriqués avec 10 et 15 % de poussières de pierre calcaire est de 20 et 24 secondes, comparativement à 24 et 25 secondes pour le mélange de référence avec ciment GU et le mélange avec fumée de silice.

Les résultats de la mesure de la maniabilité des BCR et BCP avec poussières de pierre calcaire sont illustrés à la figure 7.2.

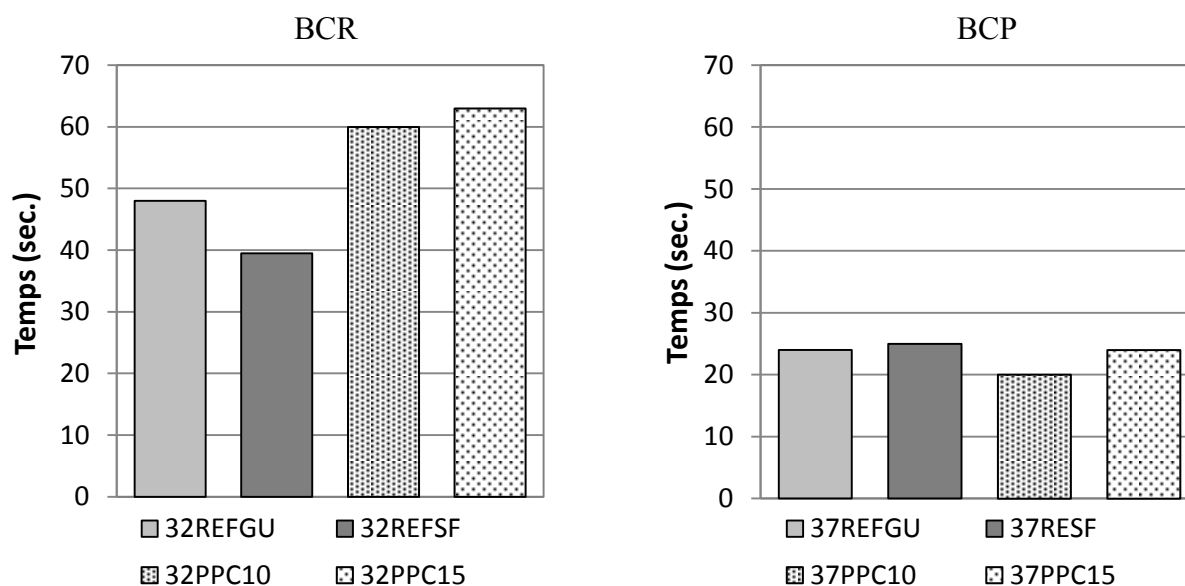


Figure 7.2 – Maniabilité des BCR et BCP avec poussières de pierre calcaire

Influence des poussières de béton concassé sur la maniabilité

Les mélanges de BCR avec poussières de béton concassé ont une maniabilité semblable à celle des mélanges de référence. Le temps Vebe des mélanges avec 10 et 15 % de poussières de béton concassé en remplacement cimentaire et du sable est de 43 et 38 secondes, comparativement à 48 et 40 secondes pour le mélange de référence avec ciment GU et le mélange avec fumée de silice.

La maniabilité des mélanges de BCP avec poussières de béton concassé est également semblable aux mélanges de référence. Le temps Vebe des mélanges avec 10 et 15 % de poussière de béton concassé est de 18 et 28 secondes, comparativement à 24 et 25 secondes pour le mélange de référence avec ciment GU et le mélange avec fumée de silice.

Les résultats de la mesure de la maniabilité des BCR et BCP avec poussières de béton concassé sont illustrés à la figure 7.3.

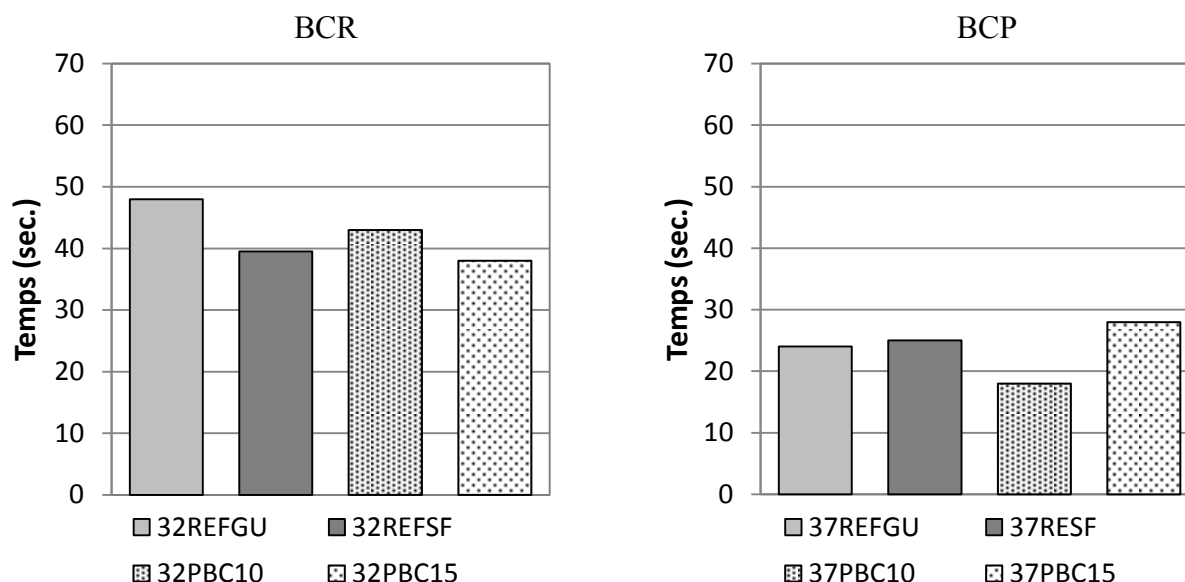


Figure 7.3 – Maniabilité des BCR et BCP avec poussières de béton concassé

7.1.3 Résistance à la compression

La résistance à la compression des échantillons de BCR et de BCP est mesurée sur des échantillons de 150 x 300 mm à un âge de 7, 28 et 91 jours. Les résultats obtenus sur les mélanges avec poudre de verre sont présentés à la figure 7.4, ceux des mélanges avec poussières de pierre calcaire sont présentés à la figure 7.5 et ceux des mélanges avec poussières de béton concassé à la figure 7.6. L'écart type de chaque essai est montré sur les graphiques. L'annexe A présente les résultats numériques des essais de compression.

Influence du rapport E/L sur la résistance à la compression

La résistance à la compression mesurée sur les mélanges de BCP est généralement égale ou supérieure à celle mesurée sur les mélanges de BCR. Le rapport E/L et le volume de pâte dans les mélanges de BCR sont respectivement de 0,32 et de 176 l/m³. Le rapport E/L des BCP est de 0,37 et le volume de pâte utilisé est de 190 l/m³. Le volume de liant utilisé dans les BCR et les BCP est de 88 l/m³. Les résultats obtenus en laboratoire en fonction du rapport E/L sont

contradictoires à la théorie classique. En effet, la résistance théorique à la compression du béton est inversement proportionnelle au rapport E/C , puisque la diminution de la quantité d'eau dans la pâte permet de rapprocher les grains de ciment les uns par rapport aux autres. L'augmentation de la densité de la pâte permet d'obtenir un béton de meilleure qualité et obtenir de meilleures performances mécaniques. La résistance à la compression des mélanges de BCR devrait donc être supérieure à celle des mélanges de BCP. Les résultats contradictoires obtenus au laboratoire sont sans doute dus à la compacité des échantillons. Il a été observé visuellement que les échantillons de BCP avaient un fini de surface plus uniforme et présentaient moins de vides de compaction que les échantillons de BCR. Étant donné leur plus grand volume de pâte, les mélanges de BCP sont plus faciles à compacter en laboratoire que les mélanges de BCR. Le plus grand volume de pâte permet une meilleure lubrification des particules du mélange et facilite leur réorganisation lors de la mise en place du béton. Le plus grand volume de pâte permet également de remplir plus aisément les vides entre les particules grossières du mélange. Il est donc juste de croire que la compacité joue un rôle prédominant sur la résistance à la compression des BCR et des BCP.

Influence de la fumée de silice sur la résistance à la compression

Dans les mélanges de BCR, la fumée de silice a peu ou pas d'effet sur la résistance à la compression. À 7 et 28 jours, le mélange avec fumée de silice montre des résistances à la compression égales au mélange avec ciment GU. À 91 jours, la résistance à la compression du mélange avec fumée de silice est légèrement inférieure au mélange avec ciment GU (diminution de 4 %).

Le mélange de BCP avec fumée de silice a montré des résistances à la compression légèrement supérieures au mélange avec ciment GU à un âge de 7 et 28 jours (augmentation de 10 et 5 %) et des résistances semblables à 91 jours.

L'apport négligeable de la fumée de silice sur la résistance à la compression des BCR et BCP (moins de 10 %) est contraire à ce qui est rapporté dans la littérature. La présence de fumée de silice dans les BCR permet habituellement une meilleure distribution de la pâte de ciment à l'intérieur du mélange, pour une même quantité d'eau. Un mélange plus homogène devrait avoir théoriquement de meilleures performances mécaniques. De plus, la fumée de silice est

bénéfique à long terme pour l'augmentation des résistances du béton grâce à sa capacité d'affiner les pores et des grains par la formation de C-S-H dans la matrice cimentaire. Puisque la fumée de silice a une surface spécifique élevée et augmente par conséquent la demande en eau dans le béton, il est possible qu'une quantité moindre d'eau soit disponible pour permettre une bonne lubrification des grains dans le mélange lors du compactage des éprouvettes. Puisque les mélanges fabriqués en laboratoire sont très secs et on a une faible teneur en ciment, il est également possible que la dispersion des fines particules de silice ne soit pas optimale lors du malaxage. Ce manque d'homogénéité des mélanges annule probablement l'effet bénéfique de la fumée de silice sur la résistance à la compression des BCR et des BCP.

Influence de la poudre de verre sur la résistance à la compression

La résistance à la compression des mélanges de BCR et de BCP est influencée proportionnellement par le taux de remplacement du ciment par la poudre de verre. De manière générale, plus grande est la quantité de poudre de verre utilisée, plus les pertes de résistances sont importantes. À un âge de 7 et 28 jours, les pertes de résistance causées par la poudre de verre sont marginales pour des taux de remplacement de 10 et 15 %. Ces pertes sont plus marquées pour des taux de remplacement de 20 et 25 %. Les pertes de résistances, proportionnellement aux mélanges de référence, sont plus faibles pour les mélanges de BCP que les mélanges de BCR. À un âge de 91 jours, la résistance à la compression des mélanges avec poudre de verre est similaire ou légèrement inférieure aux mélanges de référence. Les mélanges contenant 15 % de poudre de verre ont atteint des résistances supérieures aux mélanges de références et les mélanges contenant 25 % de poudre de verre ont donné les résistances les plus faibles. Les graphiques de la figure 7.4 montrent que les BCR et les BCP contenant de la poudre de verre développent de bonnes résistances à la compression après 91 jours de cure, mais sont moins performants à jeune âge, soit à 7 et 28 jours. Toutefois, les pertes de résistance à la compression des mélanges de BCR et de BCP ne dépassent pas 15 % jusqu'à un taux de remplacement du ciment de 20 % par la poudre de verre.

Le gain de résistance à 91 jours s'explique par la réaction pouzzolanique du verre. En consommant la chaux produite par l'hydratation du ciment, la réaction pouzzolanique du verre permet la formation de gels de C-S-H qui ont comme effet de densifier la structure de la pâte de ciment et d'augmenter la résistance en compression du béton. La réaction pouzzolanique du

verre est lente, c'est pourquoi les gains de résistance des mélanges avec poudre de verre se développent tardivement.

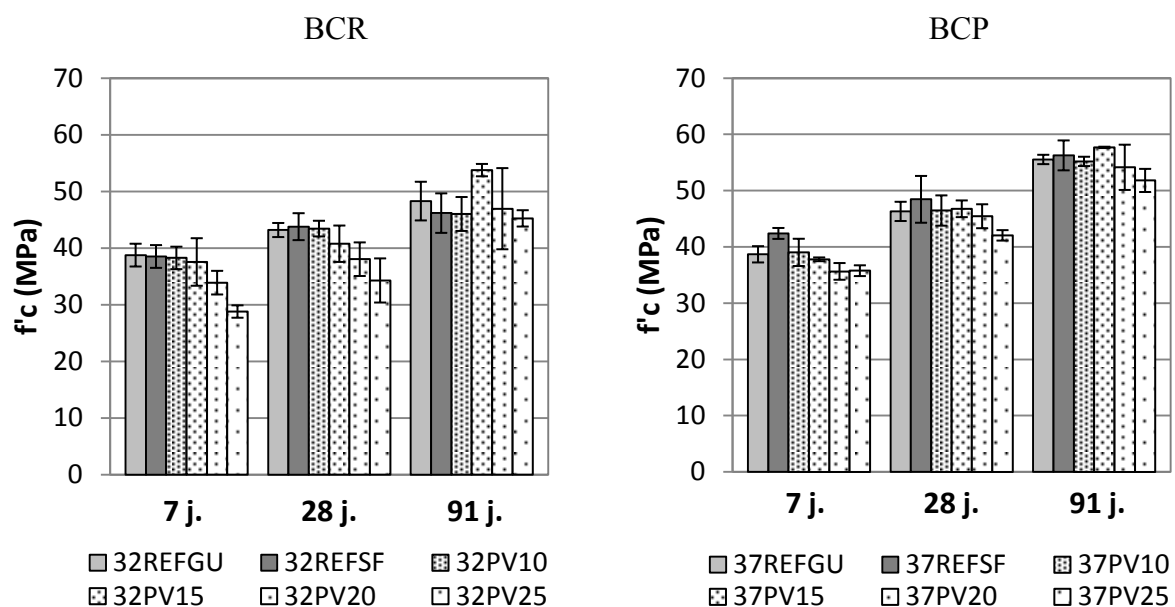


Figure 7.4 – Résistance à la compression des BCR et BCP avec PV

Finalement, la poudre de verre peut être utilisée en remplacement cimentaire dans la fabrication de BCR ou de BCP jusqu'à un taux de 20 % sans compromettre de plus de 15 % la résistance à la compression du béton à un âge de 7 jours. À un âge de 91 jours, la poudre de verre peut être utilisée jusqu'à un taux de remplacement de 25 % sans influencer significativement la résistance à la compression.

Influence des poussières de pierre calcaire sur la résistance à la compression

La résistance à la compression des BCR semble peu influencée par l'utilisation de poussières de pierre calcaire. Les pertes de résistances des mélanges de BCR avec 10 et 15 % d'ajout sont inférieures à 10 % des résistances des mélanges de références à 7, 28 et 91 jours. Par contre, les pertes de résistances sont beaucoup plus importantes dans les mélanges de BCP. Les résistances des mélanges avec 10 % de poussières de pierre calcaire sont de 10 à 15 % inférieures à celles des mélanges de référence. Les pertes de résistance des mélanges avec un taux de remplacement cimentaire de 15 % atteignent 15 à 30 %.

La perte de résistance dans les BCR et les BCP avec poussières de pierre calcaire peut s'expliquer par la distribution des grains de ciment dans le mélange. La quantité d'eau utilisée dans les mélanges avec ajout est la même que celle utilisée dans les mélanges de référence. Le remplacement d'une partie du ciment par des poussières de pierre a pour effet d'augmenter le rapport eau-ciment effectif, puisque moins de ciment est utilisé pour la même quantité d'eau. L'augmentation du rapport E/C et l'utilisation d'un matériau fin ont pour effet d'augmenter l'espace entre les grains de ciment et ainsi diminuer la densité de la pâte de ciment. Puisqu'une plus grande quantité d'eau est utilisée dans les mélanges de BCP que dans les mélanges de BCR, il est probable que l'éloignement plus grand des grains de ciment explique la perte de résistance plus importante des BCP. Les résultats des essais de résistance à la compression sont présentés à la figure 7.5.

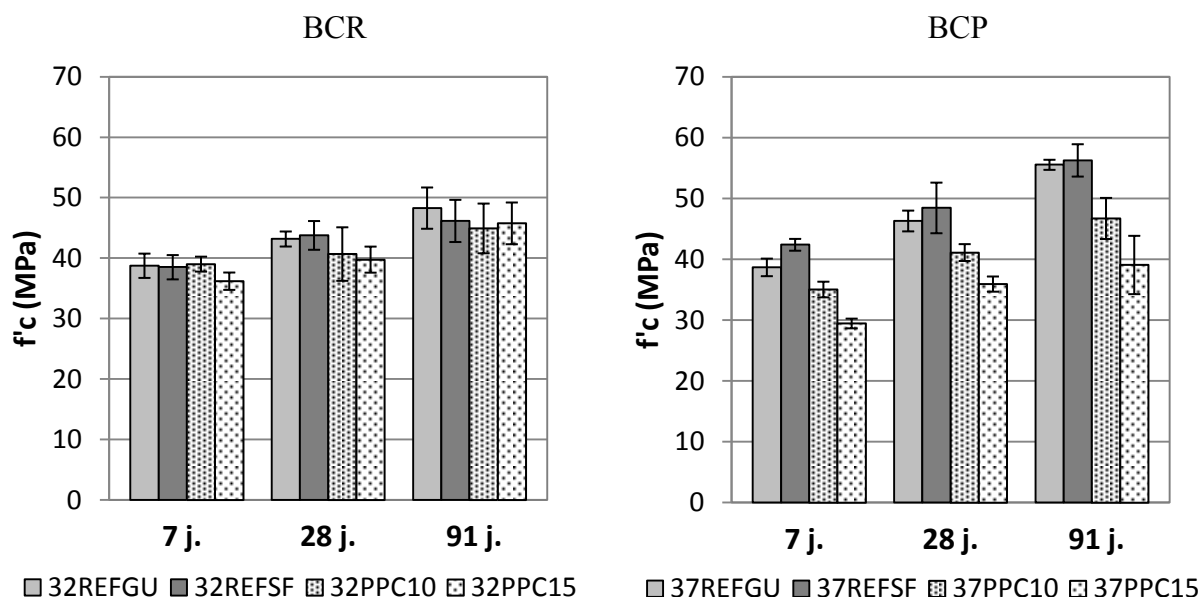


Figure 7.5 – Résistance à la compression des BCR et BCP avec PPC

Les poussières de pierre calcaire présentent donc un bon potentiel d'utilisation dans les mélanges de BCR à des taux de remplacement cimentaire de 10 à 15 %. Lorsqu'un rapport E/L plus élevé est utilisé, tel que lors de la fabrication de BCP, ce matériau présente de moins bonnes performances.

Influence des poussières de béton concassé sur la résistance à la compression

La résistance en compression des BCR et des BCP est influencée lors du remplacement du ciment et du sable par des poussières de béton concassé. Pour un taux de remplacement cimentaire de 10 %, les pertes de résistances des BCR sont inférieures à 10 % de la résistance des mélanges de référence, à un âge de 7, 28 et 91 jours. Pour un taux de remplacement de 15 %, les pertes de résistances du BCR varient entre 10 et 20 %. Tout comme les mélanges avec poussières de pierre calcaire, les mélanges de BCP avec poussières de béton concassé ont des pertes de résistances plus élevées que celles des BCR. Les pertes de résistances sont de 5 à 25 % pour un taux de remplacement cimentaire de 10 % et de 10 à 20 % pour un taux de remplacement de 15 %. Ces pertes de résistances peuvent encore une fois s'expliquer par l'augmentation du rapport E/C effectif, lors du remplacement du ciment par les poussières de béton concassé. Les résultats des essais de résistance à la compression sont présentés à la figure 7.6.

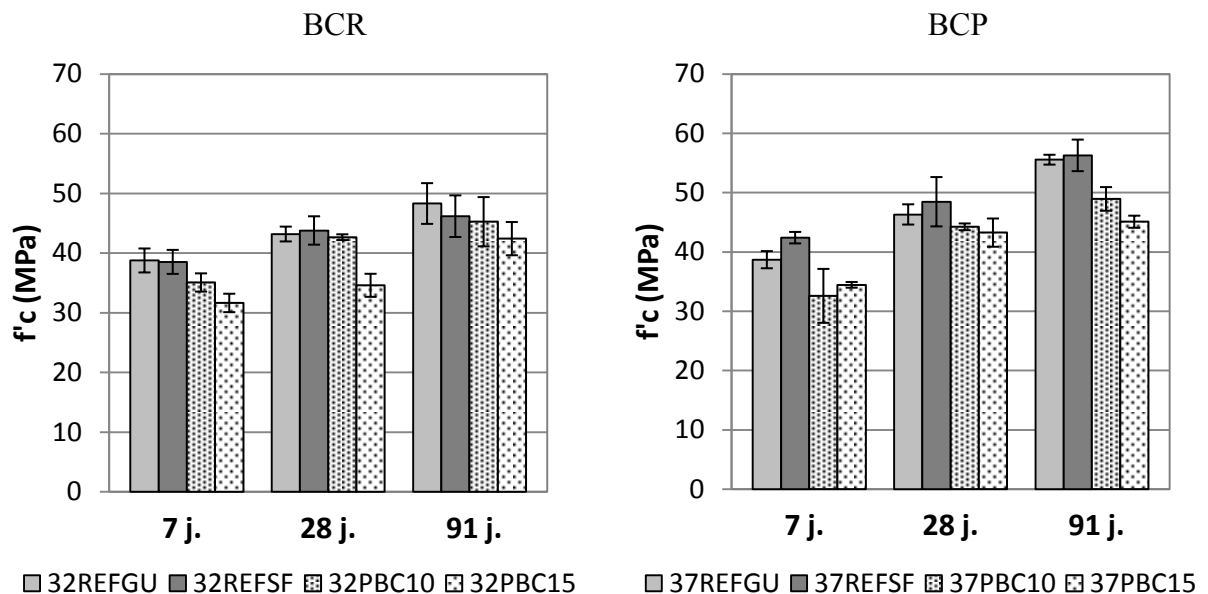


Figure 7.6 – Résistance à la compression des BCR et BCP avec PBC

Les poussières de béton concassé présentent donc un bon potentiel d'utilisation dans les mélanges de BCR à un taux de remplacement cimentaire de 10 %. Lorsqu'utilisé pour la fabrication de BCP, ce matériau présente de moins bonnes performances.

7.1.4 Résistance à la flexion

La résistance à la flexion des échantillons de BCR et de BCP est mesurée sur des échantillons de 100 x 100 x 400 mm à un âge de 7 et 28 jours. Les résultats obtenus sur les mélanges avec poudre de verre sont présentés à la figure 7.7, ceux des mélanges avec poussières de pierre calcaire sont présentés à la figure 7.8 et ceux des mélanges avec poussières de béton concassé à la figure 7.9. L'écart type des résultats de chaque mélange est montré sur les graphiques. L'annexe B présente les résultats numériques des essais de flexion.

Influence du rapport E/L sur la résistance à la flexion

La résistance à la flexion mesurée sur les mélanges de BCR est inférieure à celle mesurée sur les mélanges de BCP. Toutefois, la résistance à la compression des BCR devrait théoriquement être plus élevée, puisque le rapport E/L dans ces mélanges est inférieur à celui des BCP. Tout comme dans le cas de la résistance à la compression, la maniabilité du mélange a probablement une grande influence sur la résistance à la flexion. En augmentant la quantité d'eau dans le mélange (jusqu'à une certaine limite), il est possible d'obtenir une meilleure compacité des échantillons lors de la mise en place dans les moules et d'obtenir par conséquent de meilleures résistances mécaniques.

Influence de la fumée de silice sur la résistance à la flexion

La résistance à la flexion du mélange de référence de BCR avec fumée de silice est 9 % plus faible que celle du mélange avec ciment GU à 7 jours et 3 % plus faible à 28 jours. Dans le cas des BCP, la résistance à flexion mesurée sur le mélange avec fumée de silice est égale au mélange avec ciment GU à 7 jours et 13 % supérieure à 28 jours. La fumée de silice semble améliorer légèrement la résistance à la flexion lorsque le rapport E/L augmente de 0,32 à 0,37, mais cet effet demeure toutefois marginal. La légère augmentation des résistances observée dans le BCP avec fumée de silice est probablement obtenue grâce à la quantité supplémentaire d'eau dans le mélange. Puisque la demande en eau d'un béton augmente avec l'utilisation de fumée de silice, l'augmentation du rapport E/L de 0,32 à 0,37 permettrait une meilleure hydratation du ciment et de la fumée de silice, en plus de permettre une meilleure homogénéisation de la pâte de ciment.

Influence de la poudre de verre sur la résistance à la flexion

À un âge de 7 jours, la résistance à la flexion des BCR contenant 10, 15, 20 et 25 % de poudre de verre est de 10 à 25 % inférieure à celle du mélange de référence avec ciment GU. À un âge de 28 jours, ces mêmes mélanges montrent une perte de résistance de 10 à 20 %.

À 7 jours, la résistance à la flexion des mélanges de BCP contenant 10, 15, 20 et 25 % de poudre de verre est de 15 à 20 % inférieure à celle du mélange de référence avec ciment GU. Les pertes de résistances des mélanges avec poudre de verre sont approximativement de 15 % après 28 jours.

Les résultats des essais de résistance à la flexion réalisés sur les BCR et les BCP sont présentés à la figure 7.7.

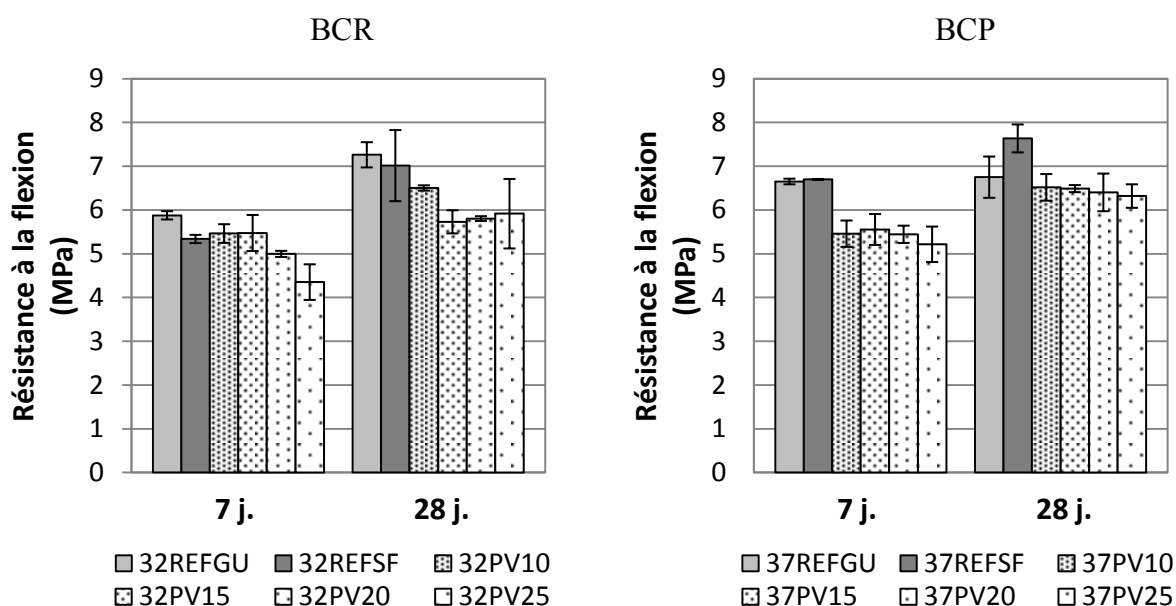


Figure 7.7 – Résistance à la flexion des BCR et BCP avec PV

Les résultats obtenus en laboratoire montrent que l'utilisation de la poudre de verre réduit les résistances à la flexion des mélanges de BCR et de BCP à 7 et 28 jours. Ces baisses de résistances peuvent être problématiques lors de la construction de revêtement en béton compacté au rouleau, car la mise en service est habituellement rapide après la construction. Une résistance minimale à la flexion après 7 jours est habituellement le critère de performance spécifié au devis pour ce type de projet. Dans le cas où la mise en service du pavage n'est pas

un critère décisif dans l'échéancier du projet, l'utilisation de la poudre de verre serait avantageuse, ou à tout le moins non négative, puisque l'effet bénéfique de ce matériau sur les résistances mécaniques se développe après 28 jours.

Influence de la poussière de pierre calcaire sur la résistance à la flexion

À un âge de 7 jours, les mélanges de BCR contenant 10 et 15 % de poussières de pierre calcaire en remplacement cimentaire ont des résistances à la flexion de 2 et 4 % inférieures à celles du mélange de référence avec ciment GU. À 28 jours, les résistances de ces mêmes mélanges n'ont pas augmenté et sont de 21 et 23 % inférieures à la résistance du mélange de référence.

À 7 jours, les résistances des mélanges de BCP contenant 10 et 15 % de poussières de pierre calcaire sont 25 % inférieures à celles du mélange de référence. À 28 jours, les pertes de résistances sont de 14 et 20 %.

Les résultats des essais de résistance à la flexion réalisés sur les BCR et les BCP avec poussières de pierre calcaire sont présentés à la figure 7.8.

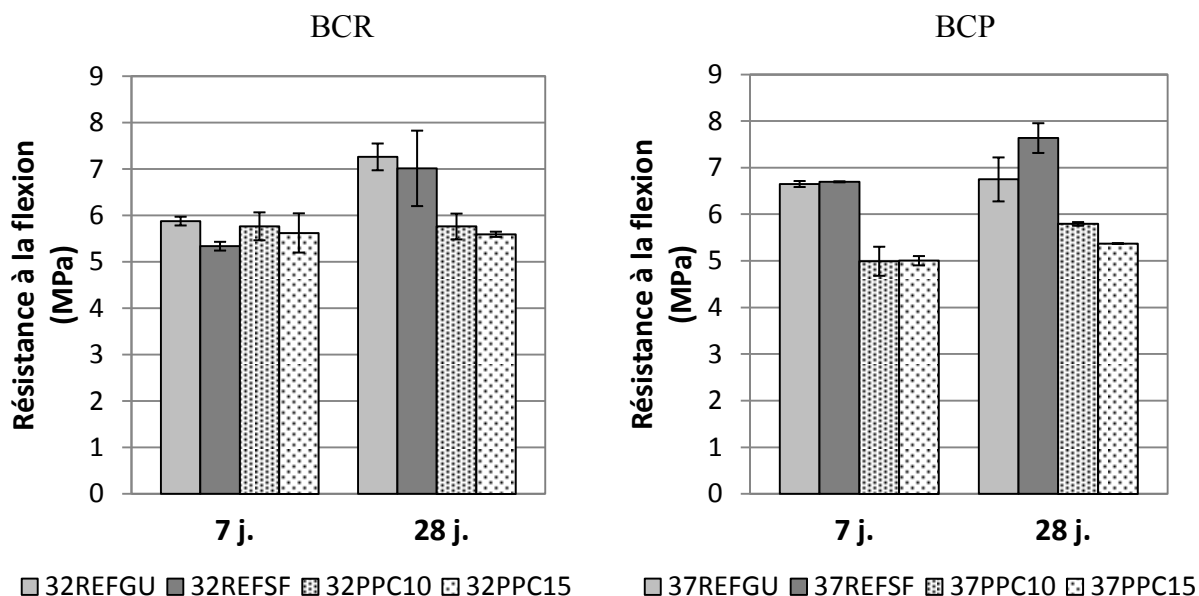


Figure 7.8 – Résistance à la flexion des BCR et BCP avec PPC

L'utilisation de poussières de pierre calcaire diminue la résistance à la flexion des mélanges de BCR et de BCP à 7 et 28 jours. Les résistances à la flexion des bétons contenant ces

poussières ne se développent peu ou pas entre 7 et 28 jours de cure. L'utilisation de 10 et 15 % de poussières de pierre calcaire dans les BCR semble toutefois avoir donné de bons résultats à 7 jours. Afin d'éviter les pertes de résistances, il serait préférable d'utiliser ce matériau principalement en remplacement du sable, puisqu'il ne présente pas de propriété pouzzolanique.

Influence de la poussière de béton concassé sur la résistance à la flexion

À un âge de 7 jours, les mélanges de BCR contenant 10 et 15 % de poussières de béton concassé en remplacement cimentaire ont des résistances à la flexion de 9 et 19 % inférieures à celles des mélanges de référence avec ciment GU. À 28 jours, les résistances de ces mêmes mélanges sont de 24 et 25 % inférieures à la résistance du mélange de référence.

À 7 jours, les résistances des mélanges de BCP contenant 10 et 15 % de poussières de pierre béton concassé sont 23 % inférieures à celles du mélange de référence. À 28 jours, les pertes de résistances sont de 14 et 18 %.

Les résultats des essais de résistance à la flexion réalisés sur les BCR et les BCP avec poussières de béton concassé sont présentés à la figure 7.9.

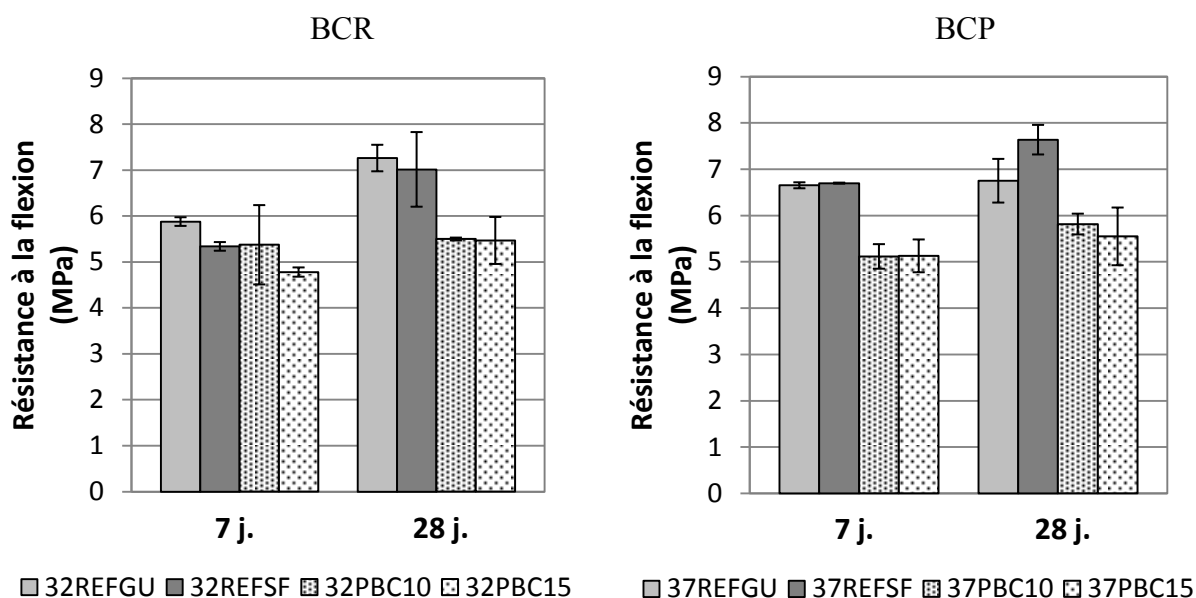


Figure 7.9 – Résistance à la flexion des BCR et BCP avec PBC

L'utilisation de poussières de béton concassé abaisse la résistance à la flexion des mélanges de BCR et de BCP à 7 et 28 jours. Les résistances à la flexion des bétons contenant ce matériau ne se développent peu ou pas entre 7 et 28 jours de cure. Les résistances à la flexion des mélanges de BCR et de BCP avec poussières de béton concassé sont similaires à celles mesurées dans les mélanges avec poussières de pierre calcaire. On peut donc conclure qu'il n'y a pas d'hydratation significative des particules cimentaires anhydres contenues dans les poussières de béton concassé.

7.1.5 Pénétration des ions chlore

Des essais préliminaires ont démontré que la compacité des échantillons de BCR fabriqués en laboratoire n'est pas suffisante pour réaliser l'essai de pénétration aux ions chlore. Étant donné la présence de vides de compaction dans les échantillons, la variabilité des résultats obtenus était beaucoup trop grande pour ce type de mélange. Contrairement aux mélanges de BCR, la variabilité des résultats obtenus lors de l'essai sur les BCP s'est montrée beaucoup plus acceptable. Le choix des BCP s'est donc arrêté sur les deux mélanges de référence et les mélanges contenant 15 et 25 % de poudre de verre en remplacement cimentaire. Seulement la poudre de verre a été choisie pour la réalisation de cet essai, car ce matériau présente un fort potentiel pouzzolanique, au contraire des poussières de concassage. Les essais sont réalisés sur trois échantillons, après 28, 56 et 91 jours de cure.

Puisque les bétons compactés au rouleau ne contiennent pas d'armature pouvant être corrodée, la pénétrabilité aux ions chlore n'est pas un critère de performance pour ce type de béton. L'essai de pénétration aux ions chlore réalisé dans le cadre de ces travaux a pour but l'étude du développement de la microstructure des bétons secs avec poudre de verre. Les résultats de l'essai et leur écart type sont présentés à la figure 7.10 et les résultats détaillés à l'annexe C.

Effet de la fumée de silice sur la pénétration des ions chlore

La fumée de silice permet sans aucun doute de diminuer considérablement le transport d'ions chlore dans les BCP. À 28, 56 et 91 jours, la charge mesurée dans le mélange avec fumée de silice est plus ou moins 80 % plus faible que celle mesurée dans le mélange contenant

seulement du ciment de type GU. Selon la classification proposée par la norme ASTM C 1202, la pénétrabilité du BCP avec fumée de silice est très faible, tandis que celle du BCP avec ciment GU est faible, pour des âges de 28, 56 et 91 jours. Les résultats montrent l'efficacité de la fumée de silice à réduire la porosité capillaire des BCP après seulement 28 jours de cure humide.

Effet de la poudre de verre sur la pénétrabilité des ions chlore

La charge mesurée dans les mélanges avec poudre de verre est inférieure à celle mesurée dans le mélange de référence avec ciment GU, à l'exception du mélange contenant 15 % de poudre de verre à un âge de 28 jours. La pénétration des ions chlores diminue lorsque la teneur en poudre de verre augmente de 15 à 25 % dans les mélanges de BCP. Ces diminutions sont de 62, 54 et 58 % respectivement à 28, 56 et 91 jours. Pour chaque mélange avec poudre de verre, la charge mesurée diminue de moitié entre 28 et 56 jours, ainsi qu'entre 56 et 91 jours.

La charge mesurée sur les échantillons avec poudre de verre est toujours supérieure à celle mesurée sur le mélange avec fumée de silice, à l'exception du mélange contenant 25 % de poudre de verre. Ce mélange présente des résultats similaires au mélange avec fumée de silice à 106 jours. Bien que l'essai ait été réalisé deux semaines plus tard sur ce mélange que sur le mélange avec fumée de silice, il est justifiable de croire que l'utilisation de 25 % de poudre de verre permet d'obtenir des performances similaires à la fumée de silice à 91 jours.

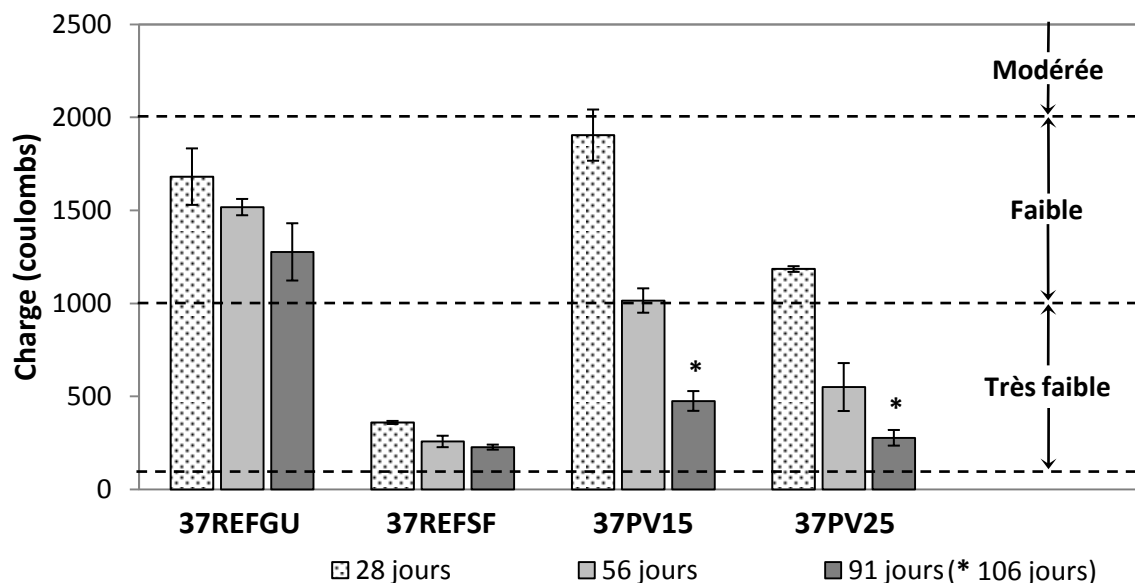


Figure 7.10 – Pénétration des ions chlore dans les BCP

Bien que l'effet bénéfique de la poudre de verre soit plus lent que celui de la fumée de silice, la poudre de verre permet de réduire considérablement le transport des ions chlore dans la matrice cimentaire des BCP après 91 jours de cure humide. Les résultats obtenus en laboratoire démontrent l'efficacité de la poudre de verre à densifier la pâte de ciment. La pénétrabilité faible à très faible des ions chlores dans le béton fabriqué avec de la poudre de verre est un indice d'une pâte de ciment ayant une discontinuité dans sa porosité capillaire. Une pâte de ciment de qualité est un avantage certain concernant la durabilité du béton. L'effet bénéfique de la poudre de verre sur la qualité de la pâte de ciment laisse envisager de bonnes résistances aux cycles de gel dégel et aux sels de déglacage pouvant dégrader la qualité du béton. Au point de vue de la durabilité des BCP, la poudre de verre présente une bonne alternative à la fumée de silice. Des essais supplémentaires portant sur la durabilité seraient toutefois essentiels pour confirmer cette hypothèse.

7.2 Bétons moulés à sec en usine

Cette section de chapitre présente les résultats des essais réalisés sur des éléments de béton moulé à sec en usine. Des blocs de maçonnerie et des pavés ont été fabriqués avec de la poudre de verre en remplacement cimentaire. La masse volumique, l'absorption et la résistance à la compression ont été mesurées sur les blocs de maçonnerie. La masse volumique, l'absorption, la résistance à la compression et la résistance à l'écaillage ont été mesurées sur les pavés. Les résultats détaillés des essais réalisés sur les blocs de maçonnerie et sur les pavés sont présentés respectivement dans l'annexe D et E.

7.2.1 Blocs de maçonnerie

Effet de la poudre de verre sur la masse volumique et l'absorption des blocs

Selon les résultats montrés à la figure 7.11, la poudre de verre permet d'augmenter la masse volumique des blocs de maçonnerie pour des taux de remplacement de 10 à 25 %. La masse volumique maximale est obtenue lorsque 20 % de poudre de verre est utilisé dans les blocs. L'utilisation de 30 % de poudre de verre diminue légèrement la masse volumique des blocs, comparativement aux mélanges de référence. L'utilisation de 10 à 20 % de poudre de verre permet de diminuer l'absorption des blocs de maçonnerie. L'utilisation de 25 et 30 % de poudre de verre augmente toutefois l'absorption des blocs.

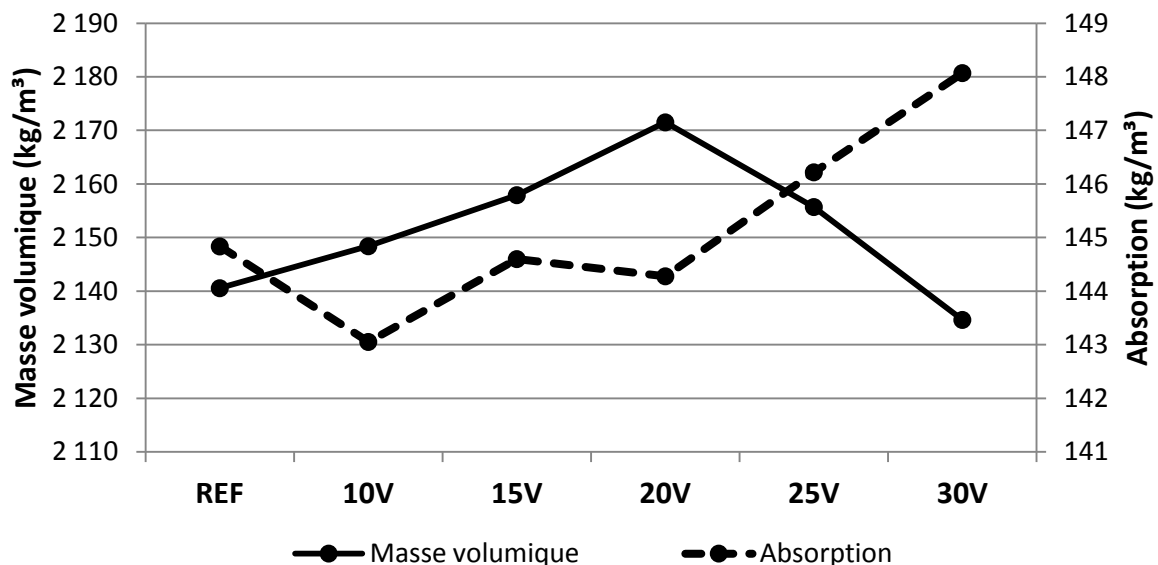


Figure 7.11 – Masse volumique et absorption des blocs de maçonnerie à 28 jours

L'augmentation de la masse volumique et la diminution de l'absorption des blocs de béton sont un indice de l'amélioration de la qualité de la pâte de ciment par la poudre de verre. La diminution des vides capillaires par la formation de produits d'hydratation permet d'augmenter la densité de la pâte et de réduire l'absorption de l'eau par le béton. L'utilisation jusqu'à 20 % de poudre de verre semble donc être un avantage pour la microstructure des blocs de maçonnerie. Un avantage indirect de l'absorption plus faible des blocs avec poudre de verre est la réduction de la quantité de peinture nécessaire pour recouvrir ces éléments, lorsqu'utilisés pour la fabrication de murs intérieurs. Cet avantage est une valeur ajoutée à l'utilisation de poudre de verre dans la fabrication de blocs de maçonnerie. Bien que l'absorption et la masse volumique des blocs de maçonnerie ne soient pas des valeurs minimales à obtenir pour respecter la norme CSA A165.1, ces valeurs permettent de classer les éléments de maçonnerie. Par exemple, un élément de type A a une masse volumique supérieure à 2000 kg/m^3 et une absorption inférieure à 175 kg/m^3 . Ces critères sont les plus sévères selon la classification de la norme et les blocs fabriqués en usine respectent amplement ces critères.

Effet de la poudre de verre sur la résistance à la compression des blocs

L'utilisation de 10 à 15 % de poudre de verre permet d'obtenir des résistances égales ou supérieures au mélange de référence. Des taux de remplacement de 20 à 30 % diminuent légèrement la résistance à la compression des blocs, proportionnellement à la quantité de poudre de verre utilisée. Après 28 jours, les gains de résistances à la compression des éléments de maçonnerie sont négligeables, car les blocs sont conservés dans des conditions ambiantes. La cure humide prolongée de ces blocs permettrait sans doute d'augmenter leur résistance. Les résultats des essais de résistance à la compression des blocs de maçonnerie sont illustrés à la figure 7.12.

Selon la classification proposée par la norme CSA A165.1, les éléments de maçonnerie ont habituellement une résistance à la compression, basée sur l'aire de section nette moyenne, comprise entre 10 et 30 MPa. Les éléments produits le plus couramment au Canada ont une résistance en compression de 15 MPa. La résistance à la compression nominale utilisée pour classer les blocs de maçonnerie ne dépend pas de l'âge de l'échantillon. Les blocs de référence et les blocs contenant 10, 15 et 20 % de poudre de verre ont atteint une résistance de 15 MPa

après 7 jours et les mélanges contenant 25 et 30 % de poudre de verre ont atteint cette valeur après 14 jours.

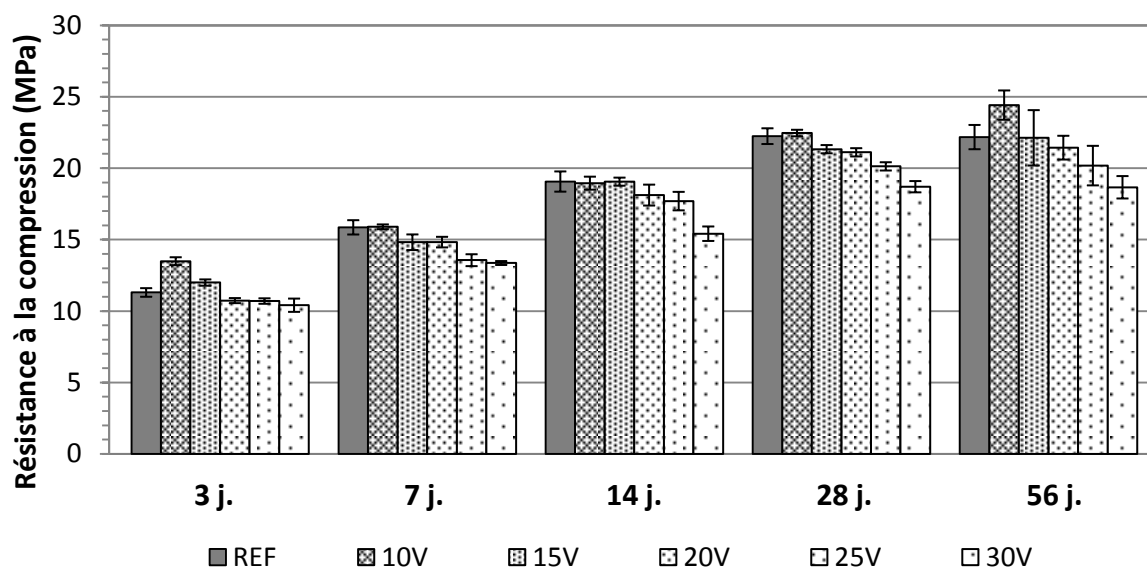


Figure 7.12 – Résistance à la compression des blocs de maçonnerie

L'utilisation de poudre de verre en remplacement cimentaire dans les blocs de maçonnerie est donc faisable en ce qui concerne le critère de la résistance à la compression. La résistance à la compression de 15 MPa est toutefois atteinte un peu plus tardivement pour des taux de remplacement de 25 et 30 %.

La faisabilité de l'utilisation de la poudre de verre dans les blocs de maçonnerie est aussi justifiée par la résistance à 3 jours des blocs. La résistance à jeune âge des blocs est critique, car après 48 heures de cure, les blocs sont emballés, stockés et livrés dans les jours suivants. La résistance équivalente des blocs de maçonnerie avec poudre de verre permet leur manutention à jeune âge, au même titre que les blocs sans poudre de verre.

7.2.2 Pavés

Effet de la poudre de verre sur la masse volumique et l'absorption des pavés

L'utilisation de poudre de verre dans la fabrication de pavés diminue la masse volumique de ces éléments pour des taux de 15, 20, 25 et 30 %. L'utilisation de 15 % de poudre de verre ne réduit que marginalement la masse volumique des pavés. L'utilisation de 25 % de poudre de

verre semble être le taux de remplacement qui diminue le plus la masse volumique des pavés. Par contre, cette baisse de masse volumique est probablement due à un manque de compaction de l'échantillon lors de sa fabrication en usine.

L'absorption des pavés avec poudre de verre est égale ou inférieure au mélange de référence, à l'exception du mélange contenant 25 % de poudre de verre. L'absorption supérieure de ce mélange est probablement encore une fois reliée à la compacité inférieure de cet échantillon. Les résultats sont présentés à la figure 7.13.

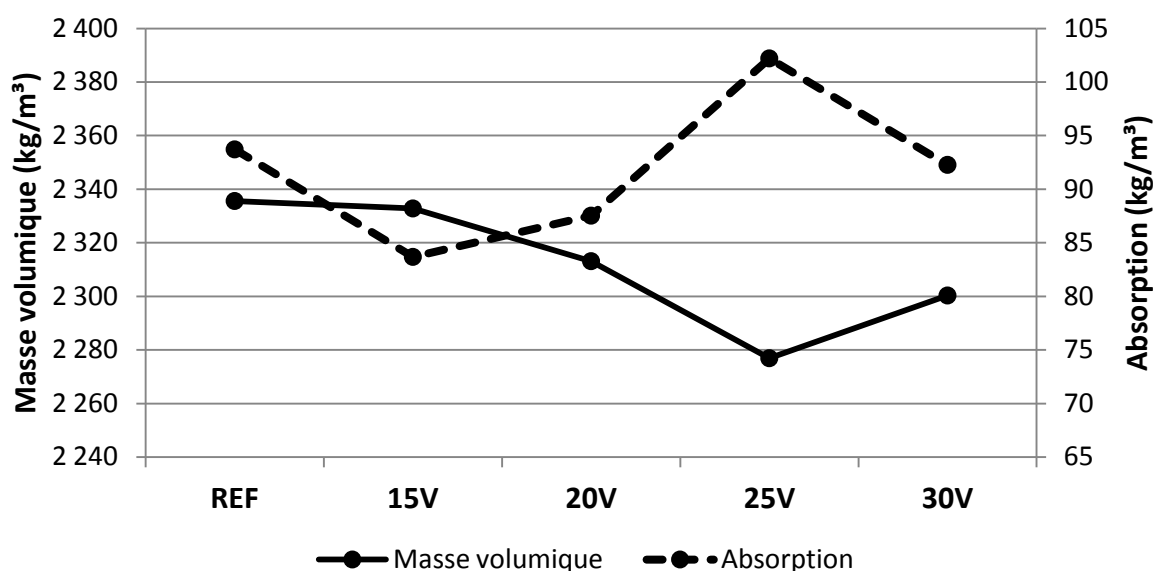


Figure 7.13 – Masse volumique et absorption des pavés à 28 jours

Effet de la poudre de verre sur la résistance à la compression des pavés

Les résistances à la compression des pavés mesurées à un âge de 28 et 91 jours sont présentées à la figure 7.14. Les résistances à 28 jours des mélanges contenant 15, 20 et 30 % de poudre de verre sont égales ou supérieures au mélange de référence. Le mélange contenant 25 % de poudre de verre a une résistance à la compression inférieure à celle du mélange de référence. À un âge de 91 jours, la résistance à la compression du mélange de référence dépasse celle de tous les mélanges avec poudre de verre. À l'exception du mélange contenant 25 % de poudre de verre, la résistance à la compression des pavés à 28 jours respecte l'exigence minimale de 50 MPa de la norme CSA A231.2.

La variabilité des résultats sous-estime probablement la résistance à la compression du mélange de référence et du mélange contenant 25 % de poudre de verre, à un âge 28 jours. Cette variabilité est illustrée à la figure 7.14 à l'aide de l'écart type représenté par les barres d'erreurs sur les diagrammes à bandes. L'augmentation importante des résistances à 91 jours laisse également présager que les résistances de ces deux mélanges ont été sous-estimées à 28 jours. La variabilité des résultats peut s'expliquer par la présence de vides de compaction dans les pavés causés par une mauvaise consolidation du béton dans le processus de fabrication. La presse hydraulique utilisée lors de l'essai de compression à 28 jours n'est pas la même que celle utilisée à 91 jours. Ceci peut expliquer la variabilité plus faible des résultats à 91 jours.

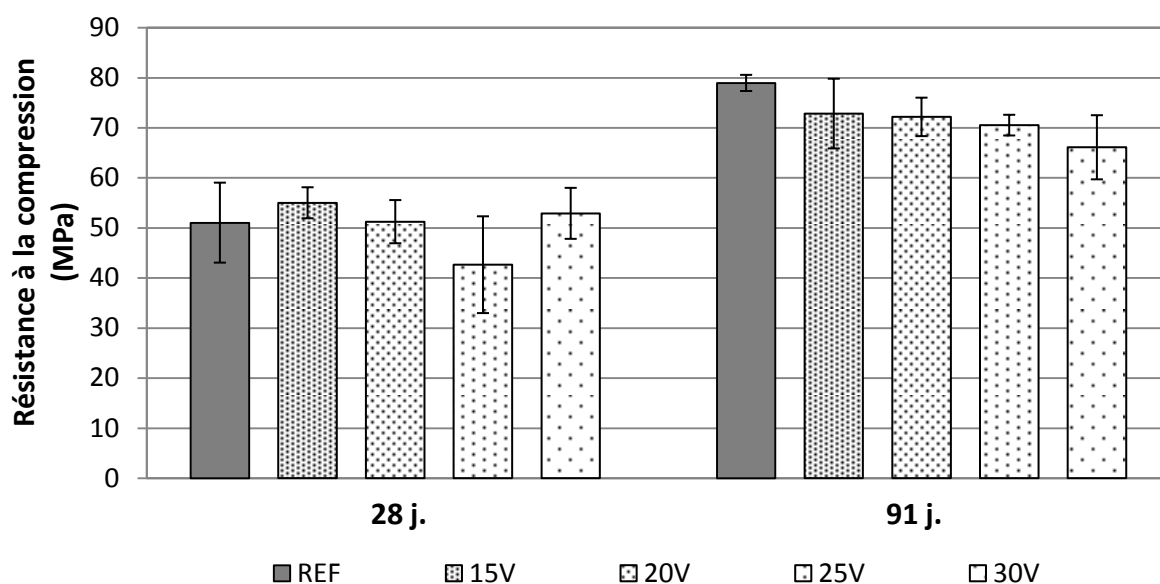


Figure 7.14 – Résistance à la compression des pavés

La résistance à 28 jours des pavés fabriqués en usine montre le potentiel d'utilisation de la poudre de verre pour la fabrication de pavés. L'utilisation de 15 à 30 % de poudre de verre en remplacement cimentaire permet de respecter les exigences minimales imposées par les standards canadiens en ce qui concerne la résistance à la compression.

Influence de la poudre de verre sur la résistance à l'écaillage

Les pertes par écaillage des pavés immergés dans une solution de NaCl à 3 % sont recueillies après 7, 28 et 49 cycles de gel-dégel. Les pertes cumulatives exprimées en kg/m^2 sont illustrées à la figure 7.15.

Selon la norme CSA A231.2 – 06, la perte de masse des pavés après 28 cycles de gel-dégel ne doit pas excéder 225 g/m^2 . Dans le cas où la perte de masse excède 225 g/m^2 , l'essai doit être poursuivi jusqu'à 49 cycles et les pertes ne doivent pas dépasser 500 g/m^2 . Le mélange de référence et le mélange contenant 20 % de poudre de verre ont eu une perte de masse inférieure à 225 g/m^2 après 28 cycles. Bien que facultatif, l'essai a été maintenu jusqu'à 49 cycles pour ces deux mélanges. Les mélanges avec 15 et 25 % de poudre de verre ont dépassé la limite de 225 g/m^2 après 28 cycles de gel-dégel, mais ont toutefois présenté des pertes de masse inférieures à 500 g/m^2 , après 49 cycles. Le mélange contenant 30 % de poudre de verre a dépassé la limite imposée après 28 et 49 cycles. Il est à noter que les résultats d'un échantillon du mélange avec 15 % de poudre de verre ont été écartés, étant donné la trop grande variabilité de ceux-ci (voir annexe E).

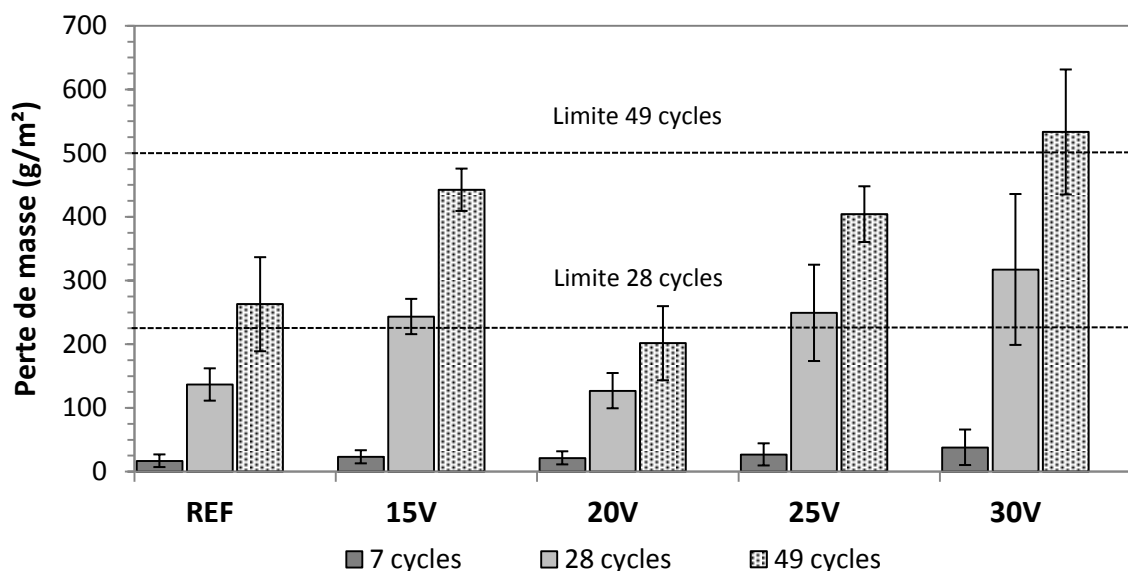


Figure 7.15 – Résistance à l'écaillage des pavés

La variabilité des résultats d'écaillage peut s'expliquer par la qualité des échantillons. En effet, lors de la production en usine, plusieurs facteurs peuvent varier : humidité du mélange, ségrégation des granulats, densité du produit final, prise initiale du ciment causée par un temps d'attente trop long avant la mise en place et variation de température et d'humidité dans les chambres de cure. Tous ces facteurs peuvent expliquer les variations obtenues dans les pertes de masse des échantillons. Ces variations peuvent également expliquer pourquoi le mélange contenant 20 % de poudre de verre performe mieux que ceux en contenant 15 et 25%.

Un taux de remplacement cimentaire de 20 % par la poudre de verre semble être optimal pour permettre aux pavés de résister à l'écaillage. L'utilisation de 15 et 25 % de poudre de verre donne de bons résultats bien que la perte de masse mesurée pour ces mélanges dépasse légèrement la limite de 225 g/m² après 28 cycles de gel-dégel. L'utilisation de 30 % de poudre de verre semble plus critique, mais un échantillon sur trois a respecté les exigences de la norme. L'utilisation de poudre de verre dans les pavés permet donc d'obtenir un produit durable aux cycles de gel-dégel, selon les critères de la norme CSA A231.2.

7.3 Bétons moulés à sec au laboratoire

Cette section de chapitre présente les résultats des essais réalisés sur les bétons moulés à sec fabriqués en laboratoire. La maniabilité de tous les mélanges est évaluée à l'aide d'une presse à cisaillement giratoire (ICT). L'absorption, la masse volumique, la résistance à la compression et la résistance à la traction sont mesurées sur les éprouvettes fabriquées à l'aide de cette presse.

7.3.1 Maniabilité

Dynamique de compaction

La contrainte de cisaillement mesurée lors du compactage est directement reliée à la compacité du mélange de béton sec. Par exemple, à la figure 7.16, lorsque la courbe du cisaillement interne du mélange de référence atteint sa valeur minimale (après 40 cycles), la compacité du béton atteint 98 % de la masse volumique théorique. La compacité peut donc être jugée maximale lorsque la contrainte de cisaillement dans l'échantillon est minimale.

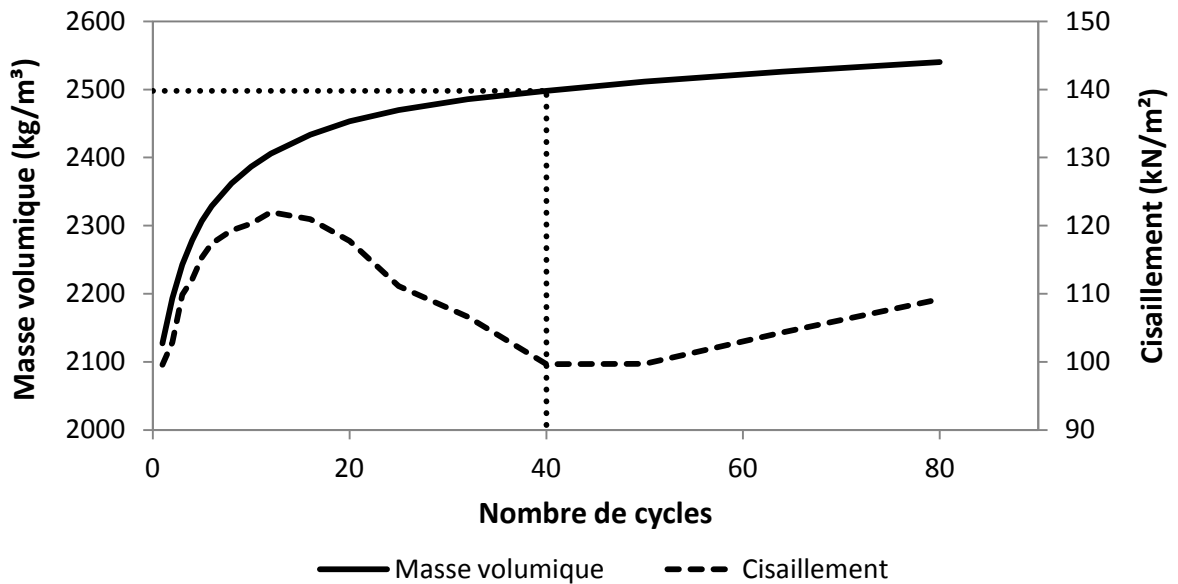


Figure 7.16 – Dynamique de compaction du mélange de référence

Lorsque le nombre de cycles de compaction requis pour atteindre la valeur minimale de cisaillement est atteint, l'augmentation de la masse volumique est négligeable, mais le

cisaillement a tendance à augmenter par la suite. Lors des cycles de compaction supplémentaires, l'augmentation du cisaillement peut s'expliquer par l'expulsion de la pâte de ciment hors de l'échantillon « slurry ». La diminution du volume de pâte a pour effet la réorganisation des granulats du mélange et l'augmentation de la friction entre les particules du mélange. La légère augmentation de la masse volumique peut s'expliquer l'expulsion de la pâte de ciment hors de la cellule, puisque l'appareil à cisaillement giratoire mesure la hauteur de l'échantillon pour en déterminer la masse volumique. Lorsque le volume de l'échantillon diminue, sa hauteur s'en trouve par le fait même diminuée et sa masse volumique surestimée.

Influence de l'âge du béton frais sur la maniabilité

Le temps écoulé entre le contact eau-ciment et la mise en place influence la maniabilité des bétons moulés à sec. La figure 7.17 montre la masse volumique et le cisaillement interne du mélange de référence avec ciment GUb-S, en fonction du nombre de cycles de cisaillement. Les mesures sont enregistrées 6 et 57 minutes après le temps de contact de l'eau et du ciment.

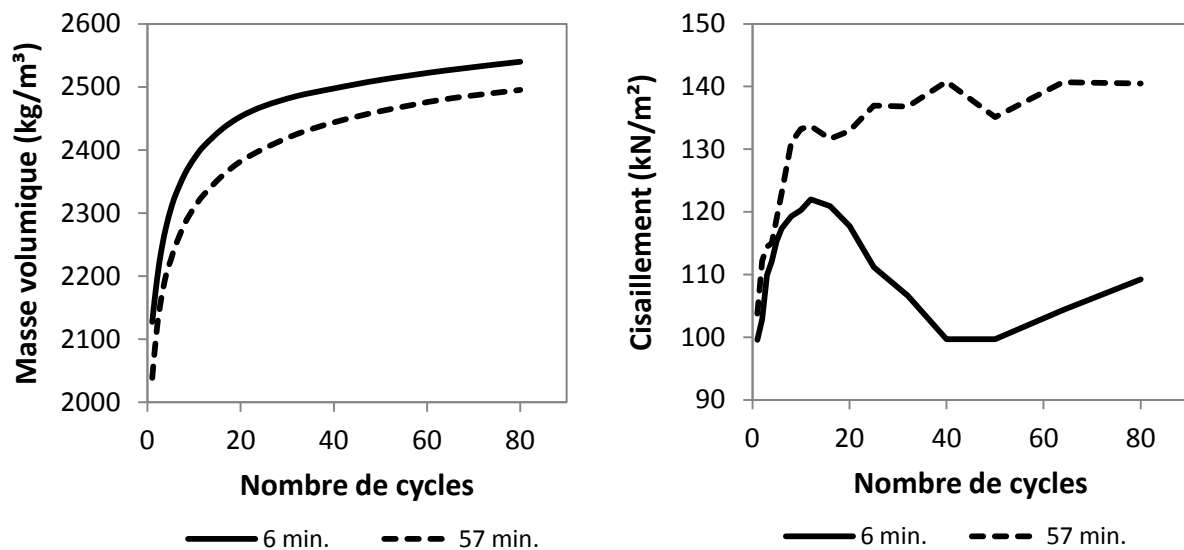


Figure 7.17 – Masse volumique et cisaillement en fonction du temps

Pour un même nombre de cycles de compaction, la masse volumique de l'échantillon fabriqué 6 minutes après le contact eau-ciment est inférieure à celle de l'échantillon fabriqué après 57 minutes. Pour un nombre de cycles donné, la compacité du second mélange est toujours inférieure au premier.

La rhéologie du béton est également variable en fonction du temps. Après 57 minutes, la contrainte de cisaillement mesurée dans l'échantillon est supérieure à celle mesurée à 6 minutes. Bien que le béton soit encore dans sa phase dormante une heure après le contact de l'eau et du ciment, la synergie de ces deux constituants a une influence sur la maniabilité du béton. Ce phénomène peut être observé dans des bétons ordinaires par la perte d'affaissement dans le temps. La perte de maniabilité dans le temps a été observée dans tous les mélanges fabriqués en laboratoire. Les courbes détaillées de l'essai de compaction de tous les mélanges sont présentées dans l'annexe F.

Influence des matériaux granulaires sur la maniabilité

La granulométrie influence de façon considérable la maniabilité des mélanges de béton moulés à sec. En effet, la maniabilité des mélanges de référence s'améliore lorsque le sable 2 est utilisé à la place du sable 1. Après 20 cycles de compactage, le mélange fabriqué avec le sable 2 a atteint 99 % de sa masse volumique théorique, tandis que le mélange fabriqué avec le sable 1 a atteint 98 % de sa masse volumique théorique après 40 cycles. L'énergie nécessaire pour compacter les mélanges fabriqués avec le sable 1 et le sable 2 est respectivement de 0,92 et 0,50 kJ/m³. Bien que ces deux mélanges aient la même distribution granulaire, l'angularité et la rugosité des particules peuvent avoir un effet important sur la maniabilité du béton. Les résultats des essais de compaction sont présentés à la figure 7.18.

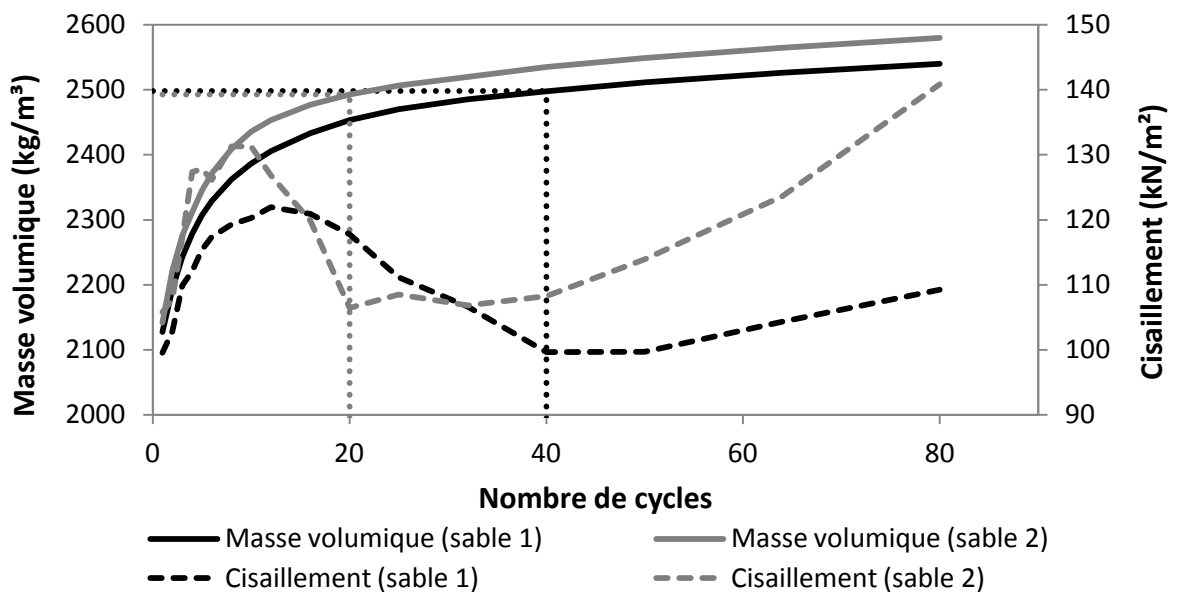


Figure 7.18 – Masse volumique et cisaillement des mélanges de référence

Influence de la fumée de silice sur la maniabilité

La fumée de silice augmente légèrement le nombre de cycles de compaction nécessaires pour obtenir une compacité maximale et augmente le travail nécessaire pour obtenir une compacité maximale du béton. Ces augmentations sont observées dans les mélanges fabriqués avec le sable 1 et le sable 2. Le tableau 7.4 présente le nombre de cycles et le travail nécessaire pour obtenir la compaction optimale des mélanges de référence et des mélanges avec fumée de silice. Le nombre de cycles nécessaire pour obtenir la compacité maximale correspond au moment où la contrainte de cisaillement atteint sa valeur minimale.

Tableau 7.4 – Maniabilité des mélanges avec fumée de silice

Mélange	Cisaillement minimal (nombre de cycles)	Travail (kJ/m ³)	Compacité
REF	40	0,92	98 %
REFSF	50	1,33	98 %
REF-2	20	0,50	99 %
REFSF-2	25	0,60	99 %

Dans les mélanges fabriqués avec le sable 1, la fumée de silice augmente de 0,92 à 1,33 kJ/m³ l'énergie nécessaire pour obtenir une compacité de 98 %. Pour les mélanges fabriqués avec le sable 2, la fumée de silice augmente de 0,50 à 0,60 kJ/m³ l'énergie nécessaire pour obtenir une compacité de 99 %. La fumée de silice a donc un effet négatif sur la maniabilité des bétons moulés à sec, puisqu'un nombre de cycles de compaction et une énergie de mise en place supplémentaires sont requis pour obtenir une compacité maximale. L'effet de la fumée de silice sur la maniabilité est toutefois modéré.

Influence de la poudre de verre sur la maniabilité

La poudre de verre a peu d'influence sur la maniabilité des bétons moulés à sec en laboratoire. Tout comme le mélange de référence, 40 cycles de compactage ont été nécessaires pour obtenir une compacité de 98 % des mélanges avec poudre de verre, à l'exception du mélange contenant 25 % de poudre de verre. Pour ce mélange, le cisaillement minimal dans l'échantillon est obtenu après 32 cycles de compactage, ce qui a permis d'atteindre une compacité de 96 %. Les résultats obtenus lors de la compaction des mélanges avec poudre de

verre sont présentés au tableau 7.5. Le nombre de cycles nécessaire pour obtenir la compacité maximale correspond au moment où la contrainte de cisaillement atteint sa valeur minimale.

Tableau 7.5 – Maniabilité des mélanges avec poudre de verre

Mélange	Cisaillement minimal (nombres de cycles)	Travail (kJ/m ³)	Compacité
REF	40	0,92	98 %
REFSF	50	1,33	98 %
15V	40	0,88	98 %
20V	40	1,13	97 %
25V	32	0,94	96 %
30V	40	0,91	98 %

Le mélange fabriqué avec 15 % de poudre de verre a requis légèrement moins d'énergie que le mélange de référence pour atteindre sa compacité maximale, tandis que le mélange fabriqué avec 20 % de poudre de verre a requis légèrement plus d'énergie. Malgré ces variations, les résultats obtenus à l'aide de l'ICT montrent que les mélanges fabriqués avec la poudre de verre requièrent une énergie de compaction similaire au mélange de référence, pour des taux de remplacement de 15 à 30 %.

Influence des poussières de pierre calcaire sur la maniabilité

La maniabilité des mélanges fabriqués avec des poussières de pierre calcaire en remplacement de 10 et 15 % du ciment et d'une partie du sable est identique à celle du mélange de référence. Tout comme le mélange de référence, la compacité maximale des mélanges avec poussières de pierre calcaire est obtenue après 20 cycles de compaction. L'énergie requise pour atteindre la compacité maximale des mélanges avec 10 et 15 % de poussières et du mélange de référence est respectivement de 0,52, 0,54 et 0,50 KJ/m³. Les résultats des essais de compaction sont présentés au tableau 7.6.

Tableau 7.6 – Maniabilité des mélanges avec poussières de pierre calcaire

Mélange	Cisaillement minimal (nombre de cycles)	Travail (kJ/m ³)	Compacité
REF-2	20	0,50	99 %
REFSF-2	25	0,60	99 %
10PPC	20	0,52	99 %
15PPC	20	0,54	99 %

Influence des poussières de béton concassé sur la maniabilité

L'utilisation de poussières de béton concassé en remplacement partiel du ciment et du sable influence la maniabilité des bétons moulés à sec. La compacité maximale du mélange de référence est obtenue après 20 cycles de compaction tandis que celle des mélanges fabriqués avec 10 et 15 % de poussières de béton concassé est obtenue après 32 et 40 cycles. Le travail nécessaire pour obtenir la compaction maximale est de 0,50 kJ/m³ pour le mélange de référence et augmente à 0,87 et 1,04 kJ/m³ pour les mélanges avec 10 et 15 % de poussières de béton concassé.

Tableau 7.7 – Maniabilité des mélanges avec poussières de béton concassé

Mélange	Cisaillement minimal (nombre de cycles)	Travail (kJ/m ³)	Compacité
REF-2	20	0,50	99 %
REFSF-2	25	0,60	99 %
10PBC	32	0,87	99%
15PBC	40	1,04	100%

7.3.2 Masse volumique et absorption

Influence de la fumée de silice sur la masse volumique et l'absorption

En comparant les résultats illustrés à la figure 7.19 et la figure 7.20, les masses volumiques mesurées sur les mélanges de référence contenant les deux différents sables demeurent semblables. Dans les mélanges contenant le sable 1, la fumée de silice diminue légèrement la masse volumique du béton (diminution de 2 %) et dans les mélanges fabriqués avec le sable 2, la masse volumique du béton demeure la même avec ou sans fumée de silice. La fumée de silice n'a donc pas d'effet significatif sur la masse volumique des bétons moulés à sec au laboratoire.

Lorsque le sable 1 est utilisé, l'absorption des mélanges avec ciment GUb-S et ciment GUb-SF est respectivement de 58 et 81 kg/m³. Lorsque le sable 2 est utilisé, l'absorption de ces mélanges est de 74 et 62 kg/m³. L'absorption des mélanges avec fumée de silice semble donc dépendre de la composition du squelette granulaire. Les résultats complets des essais d'absorption et de masse volumique sont présentés dans l'annexe G.

Influence de la poudre de verre sur la masse volumique et l'absorption

Selon les résultats présentés à la figure 7.19, l'utilisation de poudre de verre diminue la masse volumique du béton, comparativement au mélange de référence avec ciment GUb-S. La masse volumique des échantillons diminue proportionnellement à la quantité de poudre de verre utilisée. Les variations de la masse volumique du béton de l'ordre de 5 % peuvent toutefois être considérées négligeables. La densité plus faible de la poudre de verre justifie en partie la masse volumique plus faible du béton avec poudre de verre.

Les mélanges produits en laboratoire ont une masse volumique supérieure à celle des pavés fabriqués en usine. Puisque la composition des bétons fabriqués en laboratoire et en usine est semblable, c'est la compaction du béton qui influence la masse volumique du mélange. En effet, l'utilisation d'une presse à cisaillement giratoire est plus efficace pour consolider le béton que les procédés utilisés en usine pour mouler les pavés. La tendance de la poudre de verre à diminuer la masse volumique du béton est toutefois la même en usine qu'en laboratoire.

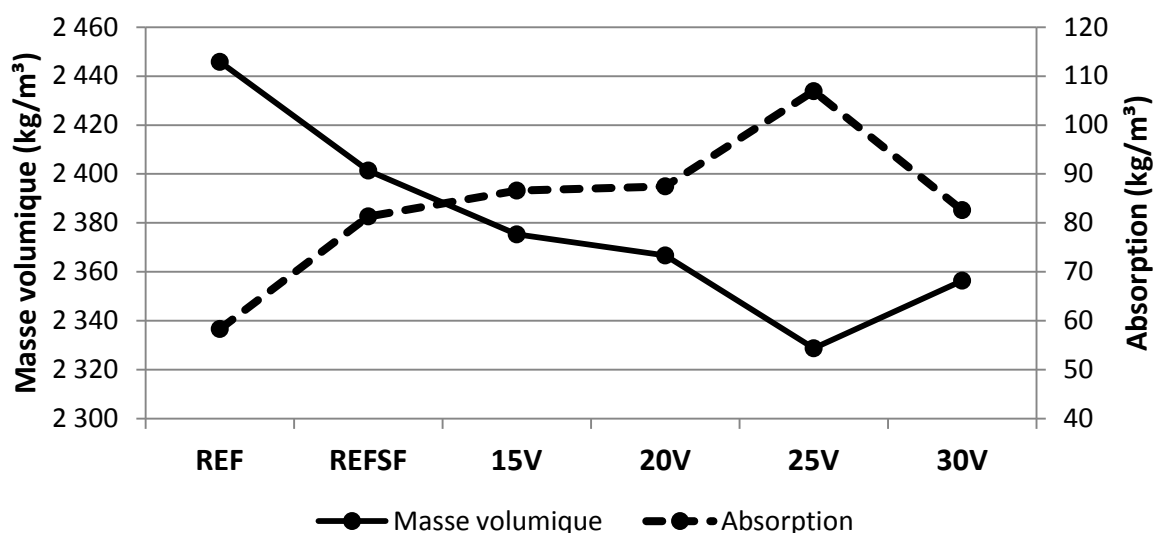


Figure 7.19 – Masse volumique et absorption des mélanges avec PV à 28 jours

L'absorption du béton est influencée par l'ajout de poudre verre. L'absorption du mélange de référence avec ciment GUb-S est de 58 kg/m³ tandis que celle des mélanges contenant 15, 20,

25 et 30 % de poudre de verre est respectivement de 87, 87, 107 et 83 kg/m³. L'utilisation de poudre de verre peut donc augmenter de 40 à 80 % l'absorption du béton à 28 jours.

L'effet pouzzolanique tardif de la poudre de verre peut expliquer en partie la plus grande absorption du béton. Après 28 jours, la poudre de verre n'a pas encore densifié au maximum la matrice cimentaire du béton moulé à sec. L'absorption du béton s'en trouve donc augmentée, puisque la poudre de verre n'a pu déconnecter le réseau de pores capillaires.

Malgré que la masse volumique des bétons fabriqués en laboratoire soit supérieure, l'absorption des ces bétons est semblable ou légèrement supérieure à celle des bétons fabriqués en usine. L'absorption plus grande des bétons fabriqués en laboratoire peut s'expliquer en partie par le rapport E/C plus élevés de ceux-ci, comparativement à celui des mélanges produits en usine. En effet, les contraintes de productions exigent habituellement d'utiliser très peu d'eau dans les mélanges, ce qui a pour résultat un produit final avec un rapport E/C très faible. L'augmentation du rapport E/C a pour effet l'augmentation de la porosité de la matrice cimentaire, puisque les particules de ciment sont plus éloignées les unes des autres.

Influence des poussières de pierre calcaire sur la masse volumique et l'absorption

Les valeurs de la masse volumique et de l'absorption des bétons fabriqués avec des poussières de pierre calcaire sont présentées à la figure 7.20.

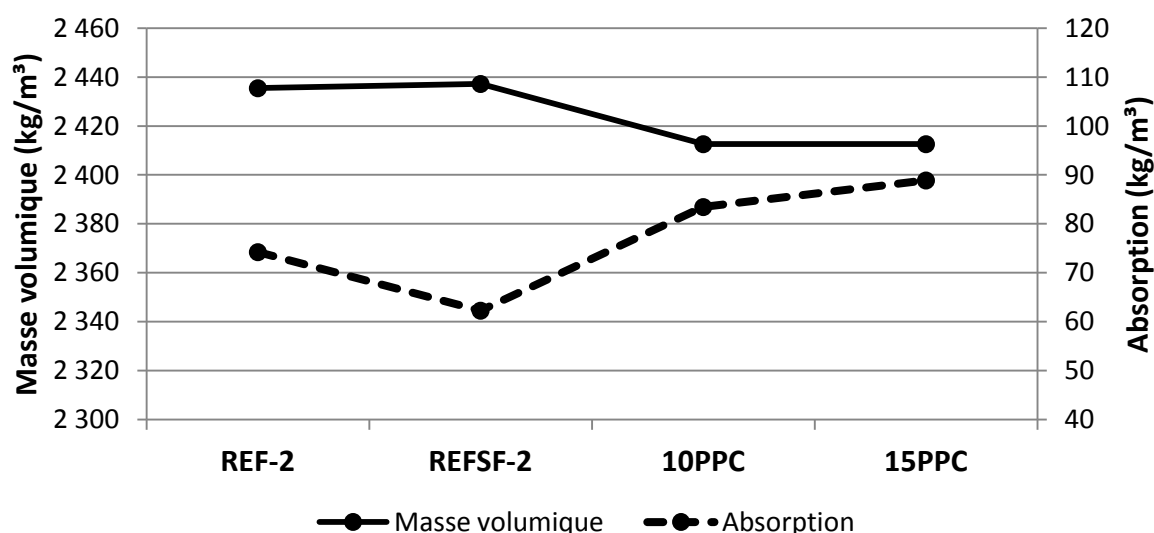


Figure 7.20 – Masse volumique et absorption des mélanges avec PPC à 28 jours

L'utilisation de pierre calcaire en remplacement d'une partie du ciment et du sable n'a pas d'effet significatif sur la masse volumique du béton. La diminution de masse volumique mesurée dans les mélanges avec poussières de pierre calcaire par rapport aux mélanges de référence est d'environ 25 kg/m^3 , ce qui représente approximativement 1 % de la masse volumique.

L'absorption du mélange de référence avec ciment GUb-S est de 74 kg/m^3 et celle des mélanges contenant 10 et 15 % de poussières de pierre calcaire est respectivement de 83 et 89 kg/m^3 . L'utilisation de poussières de pierre calcaire augmente donc l'absorption du béton. Cette augmentation est toutefois peu marquée pour l'augmentation de 10 à 15 % d'ajout cimentaire.

Influence des poussières de béton concassé sur la masse volumique et l'absorption

L'utilisation de poussières de béton concassé en remplacement de 10 et 15 % du ciment et d'une partie du sable réduit la masse volumique du béton de 32 et 48 kg/m^3 , comparativement au mélange de référence. Ces réductions sont peu significatives puisqu'elles représentent 1 et 2 % de la masse volumique du mélange de référence.

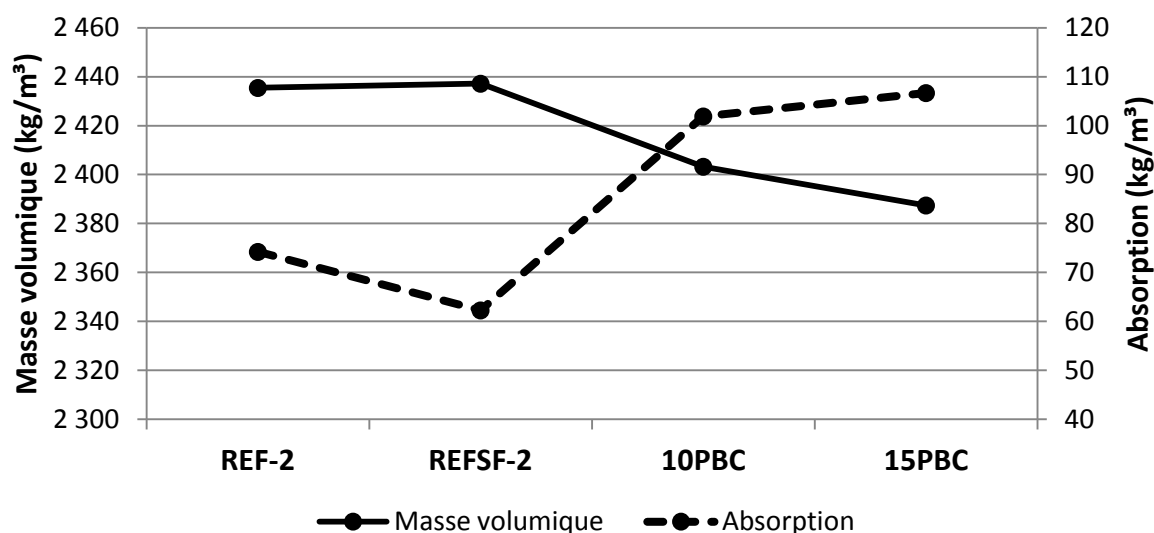


Figure 7.21 – Masse volumique et absorption des mélanges avec PBC à 28 jours

L'absorption des mélanges contenant 10 et 15 % de poussières de pierre calcaire est respectivement de 102 et 107 kg/m^3 , comparativement à 74 kg/m^3 pour le mélange fabriqué avec seulement du ciment GUb-S. Les poussières de béton concassé augmentent donc

significativement l'absorption du béton lorsqu'utilisées en remplacement partiel du ciment et du sable.

Les valeurs de la masse volumique et de l'absorption des bétons fabriqués avec des poussières de béton concassé sont présentées à la figure 7.21.

7.3.3 Résistance à la compression

Les échantillons de béton moulé à sec fabriqués en laboratoire sont curés selon la norme CSA A231.2. Les échantillons sont entreposés dans une chambre de murissement à une humidité relative de 100 % et une température de 23 °C, jusqu'à un âge de 14 jours. Ensuite, les échantillons sont placés dans une salle à une température de 23 °C et à une humidité relative de 50 %, jusqu'à la réalisation des essais. Les essais sont réalisés sur des cylindres de 100 x 100 mm. Les résultats détaillés sont présentés dans l'annexe H.

Influence de la fumée de silice sur la résistance à la compression

Les résistances à la compression du mélange fabriqué avec fumée de silice sont similaires à celles du mélange fabriqué avec du ciment GUb-S. À 28 jours, le mélange avec fumée de silice a une résistance 3 % inférieure au mélange avec ciment GUb-S. À 91 jours, le mélange avec fumée de silice a une résistance 5 % supérieure au mélange de référence. Ces faibles écarts indiquent que les ciments GUb-S et GUb-SF permettent d'obtenir des bétons moulés à sec de résistances équivalentes.

Influence de la poudre de verre sur la résistance à la compression

Tel que montré à la figure 7.22, à un âge de 28 jours, la résistance à la compression des mélanges contenant 15, 20, 25 et 30 % de poudre de verre est approximativement 15 % inférieure à celle des mélanges de référence. La poudre de verre a donc la même influence sur la résistance à la compression pour des taux de remplacement de 15 à 30 %.

À 91 jours, l'augmentation des résistances à la compression des mélanges avec poudre de verre est peu significative. La résistance du mélange avec 15 % de poudre de verre mesurée à 91 jours est 5 % plus faible que celle mesurée à 28 jours. Les gains de résistance des mélanges contenant 20, 25 et 30 % de poudre de verre sont respectivement de 15, 6 et 1 %.

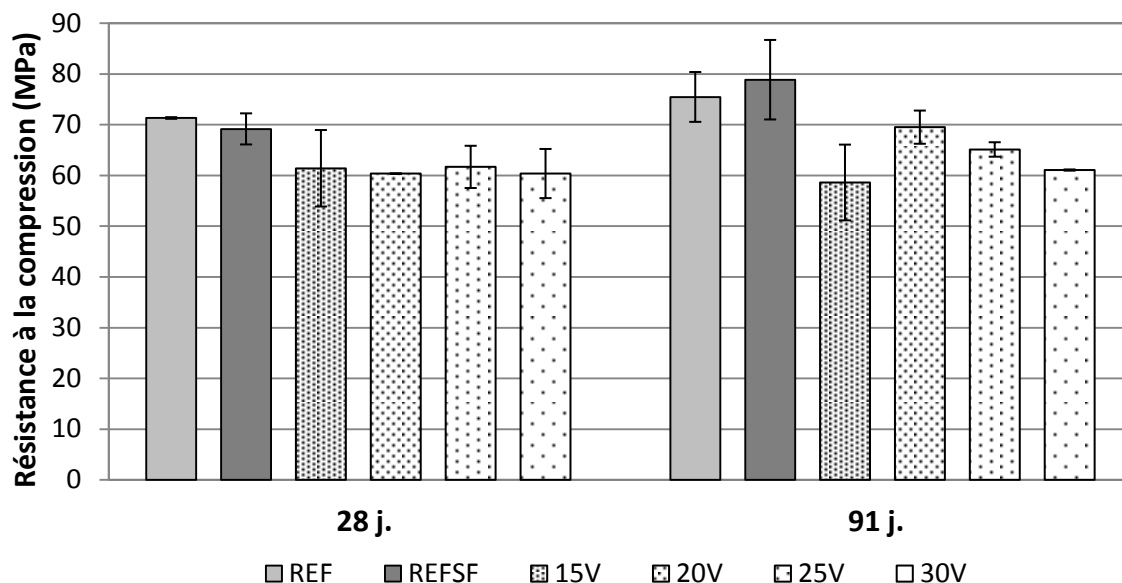


Figure 7.22 – Résistance à la compression des mélanges avec PV

L'augmentation non significative des résistances à la compression des mélanges avec poudre de verre entre 28 et 91 jours sans doute due à la cure des échantillons. En effet, puisque les échantillons sont maintenus à une humidité relative de 50 % après 14 jours, la quantité d'eau est insuffisante pour permettre à la poudre de verre de développer pleinement ses propriétés pouzzolaniques. Les résultats obtenus sur les mélanges de BCR ont démontré l'apport important de la poudre de verre sur les résistances à la compression à 91 jours, lorsque les échantillons sont maintenus à une humidité élevée. Puisque la composition des mélanges de béton moulé à sec est semblable à celle des BCR (à l'exception du diamètre maximal des granulats), il est justifié de croire que la poudre de verre requiert une cure humide prolongée pour développer pleinement les performances mécaniques du béton.

Les mélanges fabriqués en laboratoire ont des résistances à la compression à 28 jours plus élevées que celles des pavés fabriqués en usine. L'utilisation de la presse à cisaillement giratoire permet d'obtenir une compacité plus élevée et une meilleure homogénéité des échantillons que celles des pavés. La réduction des vides de compaction permet d'améliorer par conséquent la résistance à la compression du béton. Les différents ciments utilisés pour la fabrication de ces bétons ont probablement une influence significative sur les résistances à la compression des mélanges fabriqués en usine et en laboratoire.

Influence des poussières de pierre calcaire sur la résistance à la compression

Tel que montré à la figure 7.23, à un âge de 28 jours, la résistance à la compression des mélanges avec poussières de pierre calcaire est approximativement inférieure à 15 % de celle du mélange de référence avec ciment GUb-S. Au contraire des mélanges de référence, les résistances des mélanges avec poussières de pierre calcaire en remplacement de 10 et 15 % du ciment n'augmentent pas entre 28 et 91 jours. Les pertes de résistance mesurées dans ces derniers mélanges sont sans doute dues à la compacité des échantillons. En effet, les échantillons utilisés pour mesurer la résistance à la compression à 91 jours ont été fabriqués après les échantillons utilisés à 28 jours. Puisque la maniabilité du béton diminue dans le temps et que le même nombre de cycles de compactage a été utilisé pour former les échantillons, la compacité des échantillons diminue selon leur ordre de fabrication. Utiliser la presse à cisaillement giratoire pour compacter le béton jusqu'à une masse volumique donnée au lieu d'utiliser un nombre de cycles de compaction prédéterminé permettrait d'obtenir des échantillons de même compacité et de réduire les variations de résistance d'un échantillon à l'autre.

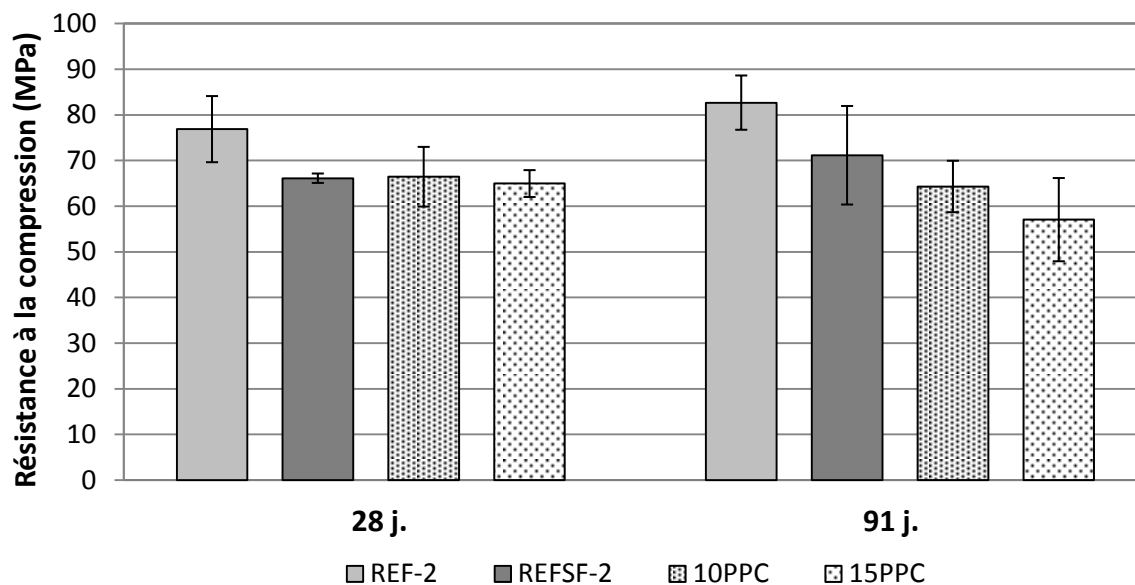


Figure 7.23 – Résistance à la compression des mélanges avec PPC

Influence des poussières de béton concassé sur la résistance à la compression

Pour des taux de remplacement cimentaire de 10 et 15 %, les résistances à la compression des mélanges avec poussières de béton concassé à 28 jours sont approximativement inférieures de 20 et 25 % de celle du mélange de référence avec ciment GUb-S. Au contraire des mélanges de référence, les résistances des mélanges avec poussières de béton concassé n'augmentent pas entre 28 et 91 jours. Ces résultats laissent présager que les mélanges fabriqués avec des poussières de béton concassé atteignent leurs performances mécaniques maximales avant 28 jours. Les résultats des essais de compression sont montrés à la figure 7.24

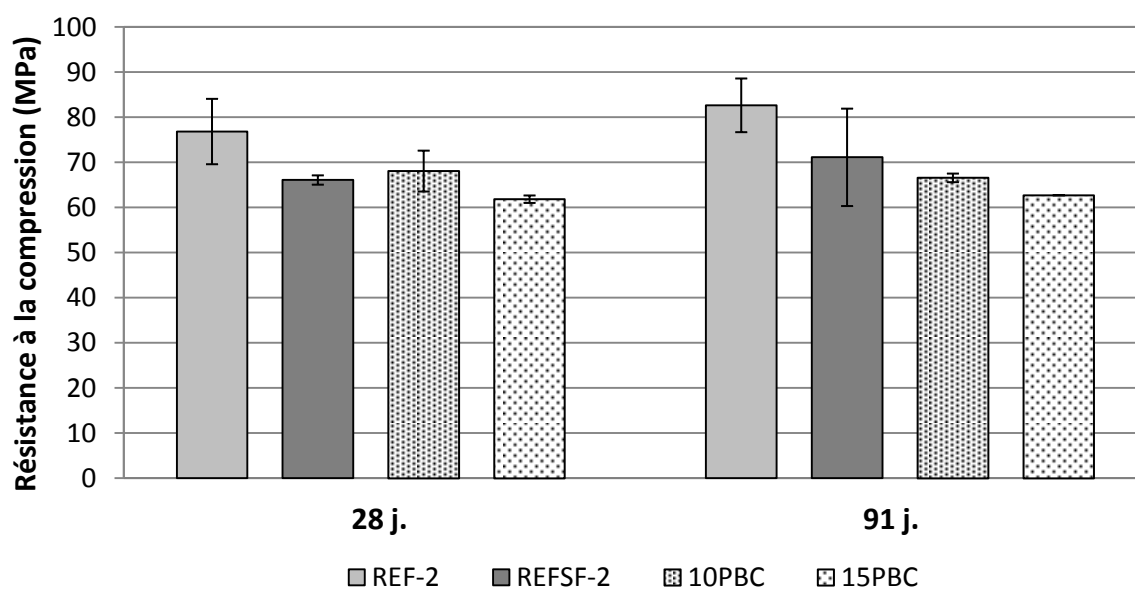


Figure 7.24 – Résistance à la compression des mélanges avec PBC

7.3.4 Résistance à la traction

Les échantillons utilisés pour les essais de résistance à la traction sont fabriqués selon la même méthode que les échantillons utilisés pour l'essai de résistance à la compression et ont le même type de murissement (voir section 7.3.3). Les résultats détaillés sont présentés dans l'annexe I.

Influence de la fumée de silice sur la résistance à la traction

Les mélanges avec fumée de silice ont une résistance à la traction inférieure à celle des mélanges avec ciment GUb-S. Dans les mélanges fabriqués avec le sable 1, la résistance du mélange avec fumée de silice est 11 % inférieure à celle du mélange avec ciment GUb-S. Lorsque le sable 2 est utilisé, la résistance à la traction du mélange avec fumée de silice est 30 % inférieure à celle du mélange avec ciment GUb-S.

La résistance à la traction des mélanges fabriqués avec le sable 1 est supérieure à celle des mélanges fabriqués avec le sable 2. La perte de résistance à la traction est beaucoup plus importante que les pertes de résistance à la compression lorsque le sable 2 est utilisé en remplacement du sable 1. La résistance à la traction du béton semble être sensible au squelette granulaire utilisé.

Influence de la poudre de verre sur la résistance à la traction

L'utilisation de 15, 20, 25 et 30 % de poudre de verre réduit respectivement la résistance à la traction du béton de 20, 20, 29 et 26 %, comparativement au mélange de référence avec ciment GUb-S. L'utilisation de poudre de verre en remplacement cimentaire réduit de façon plus importante la résistance à la traction du béton que la résistance à la compression. Les résultats de l'essai de traction par fendage sont illustrés à la figure 7.25.

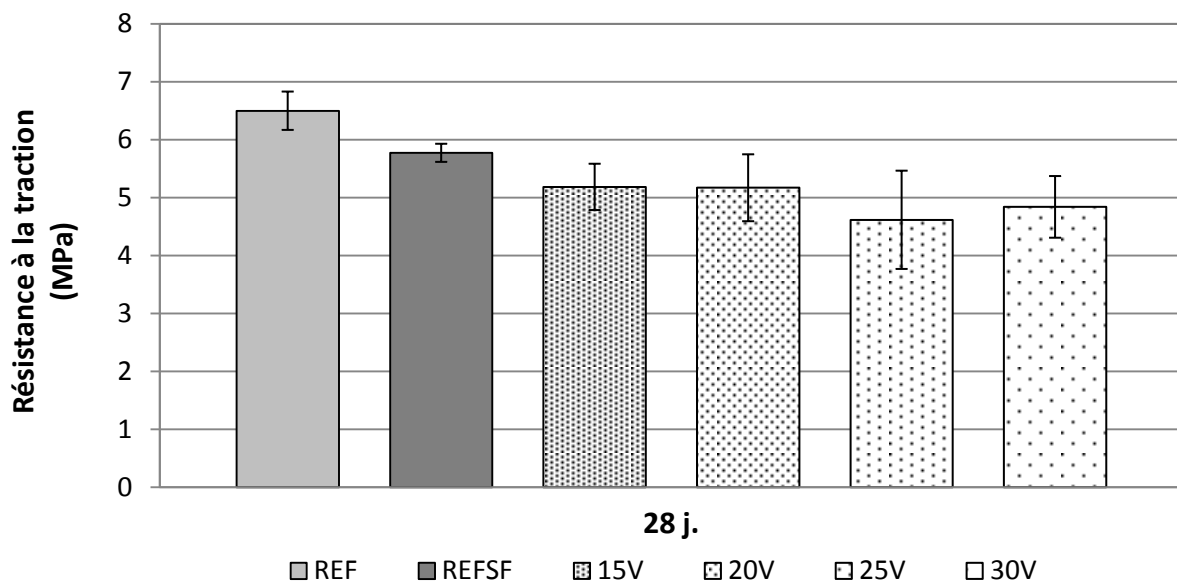


Figure 7.25 – Résistance à la traction des mélanges avec PV

Tout comme la résistance à la compression, la résistance à la traction des mélanges avec poudre de verre semble sensiblement la même pour des taux de remplacement de 15 à 30 %.

Influence des poussières de pierre calcaire sur la résistance à la traction

L'utilisation de 10 et 15 % de poussière de pierre calcaire réduit respectivement la résistance à la traction du béton de 8 et 24 %, comparativement au mélange de référence avec ciment GUb-S. Les résultats de l'essai de traction par fendage sont illustrés à la figure 7.26. Le remplacement de plus de 10 % du ciment par des poussières de pierre calcaire est donc critique pour la résistance à la traction des bétons moulés à sec.

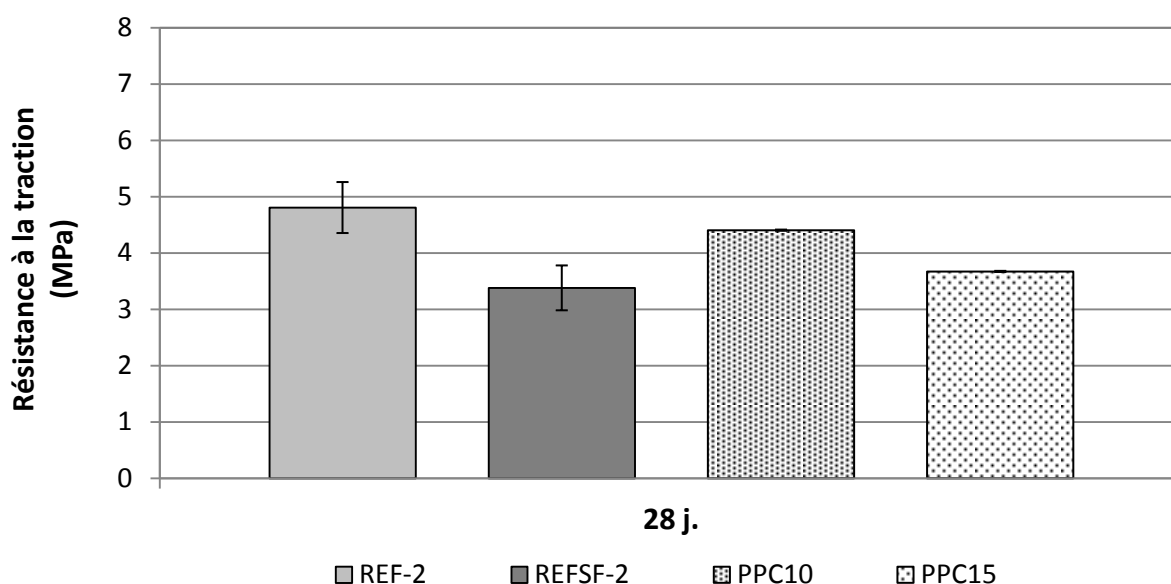


Figure 7.26 – Résistance à la traction des mélanges avec PPC

Influence des poussières de béton concassé sur la résistance à la traction

L'utilisation de 10 et 15 % de poussière de béton concassé augmente respectivement la résistance à la traction du béton de 14 et 19 %, comparativement au mélange de référence avec ciment GUb-S. Les résultats de l'essai de traction par fendage sont illustrés à la figure 7.27. Ces résultats sont toutefois contradictoires à ceux obtenus lors de l'essai de résistance à la compression. En effet, lors de cet essai, les résistances des mélanges avec poussières de béton concassé sont inférieures au mélange de référence. L'équation $f_{sp} = 0,462(f'_c)^{0,55}$ (en MPa)

proposée par Ahmad et Shad (1985) permet de calculer la résistance en traction théorique du béton à partir de la résistance à la compression, pour des mélanges dont la résistance à la compression est inférieure à 84 MPa. La résistance à la traction des mélanges contenant 10 et 15 % de poussières de béton concassé en remplacement cimentaire serait théoriquement de 4,7 et 4,5 MPa, ce qui est légèrement inférieur au mélange de référence. La résistance à la traction de ces mélanges a donc été surestimée. Il est également à noter que ces essais ont été réalisés que sur un seul échantillon pour les mélanges avec poussières de béton concassé.

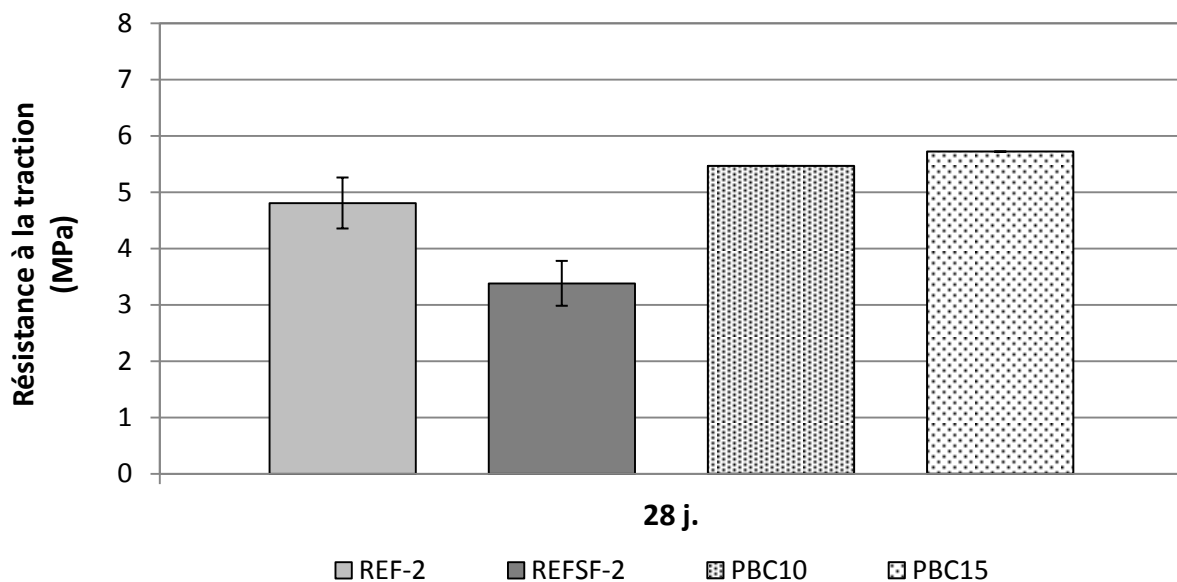


Figure 7.27 – Résistance à la traction des mélanges avec PBC

8. CONCLUSION

Les présents travaux de recherche ont permis d'étudier l'utilisation de poudre de verre, de poussières de pierre calcaire et de poussières de béton concassé en remplacement cimentaire dans les bétons compactés au rouleau, les bétons compactés à la paveuse et les bétons moulés à sec.

Afin d'évaluer le potentiel d'utilisation de ces matériaux alternatifs, la maniabilité, la résistance à la compression et la résistance à la flexion des BCR et des BCP ont été mesurées en laboratoire. La pénétration des ions chlore a été mesurée dans les BCP afin d'évaluer le développement de la microstructure du béton dans le temps. La masse volumique, l'absorption, la résistance à la compression et la résistance à la traction ont été mesurées sur les mélanges de béton moulés à sec, afin d'évaluer leurs performances, lorsque fabriqués avec les matériaux alternatifs.

Des blocs de maçonnerie et des pavés ont été fabriqués en usine afin d'évaluer le potentiel d'utilisation de la poudre de verre, en remplacement cimentaire. La masse volumique, l'absorption et la résistance à la compression ont été mesurées sur ces éléments. La résistance à l'écaillage des pavés exposés à des cycles de gel dégel a également été mesurée.

Des mélanges de béton moulé à sec ont été réalisés en laboratoire avec de la poudre de verre et des poussières de concassage. La maniabilité des bétons frais a été mesurée sur les échantillons fabriqués à l'aide d'une presse à cisaillement giratoire. La masse volumique, l'absorption, la résistance à la compression et la résistance à la traction ont été mesurées sur ces mêmes échantillons.

Les essais expérimentaux réalisés dans le cadre de ce projet ont permis de dégager les conclusions suivantes :

BCR et BCP

- L'augmentation du volume de pâte dans les bétons compactés au rouleau permet d'augmenter la maniabilité de ceux-ci et de produire en laboratoire des échantillons plus homogènes et de meilleure qualité;

- La poudre de verre a peu d'influence sur la maniabilité des BCR et améliore légèrement la maniabilité des BCP;
- De manière générale, la résistance à la compression des BCR et des BCP décroît en fonction du taux d'utilisation de la poudre de verre. Des pertes de résistance inférieures à 15 % sont mesurées dans les mélanges contenant jusqu'à 20 % de poudre de verre à un âge de 7 et 28 jours. À un âge de 91 jours, jusqu'à 25 % de poudre de verre peut être utilisée sans compromettre de plus de 15 % la résistance à la compression;
- La poudre de verre réduit la résistance à la flexion des BCR et des BCP de 10 à 25 %, selon le taux de remplacement utilisé. Les pertes de résistances des BCP avec poudre de verre sont approximativement de 15 % après 28 jours, pour des taux de remplacement de 10 à 25 %;
- La poudre de verre réduit considérablement la pénétration des ions chlorures après 56 et 91 jours. Après 91 jours, la pénétrabilité du mélange contenant 25 % de poudre de verre est similaire au mélange avec fumée de silice;
- Les mélanges de BCR avec poussières de pierre calcaire ont une maniabilité légèrement inférieure à celle des mélanges de référence. La maniabilité des mélanges de BCP avec poussières de pierre calcaire est légèrement supérieure ou égale aux mélanges de référence;
- Les pertes de résistance des mélanges de BCR fabriqués avec des poussières de pierre calcaire sont inférieures à 10 % des résistances des mélanges de références à 7, 28 et 91 jours. Les pertes de résistance des BCP peuvent atteindre de 15 à 30 %, pour des taux de remplacement de 10 à 15 %;
- L'utilisation de poussières de pierre calcaire diminue la résistance à la flexion des mélanges de BCR et de BCP à 7 et 28 jours. Les résistances à la flexion des bétons contenant ces poussières se développent peu ou pas entre 7 et 28 jours de cure;
- Les mélanges de BCR et de BCP avec poussières de béton concassé ont une maniabilité semblable à celle des mélanges de référence;
- Pour des taux de remplacement cimentaire de 10 et 15 %, les résistances à la compression des mélanges de BCR fabriqués avec des poussières de pierre calcaire sont de 10 à 20 % inférieures à celles des résistances des mélanges de références à 7, 28 et 91 jours. Les pertes de résistance des BCP peuvent atteindre de 5 à 25 %;
- L'utilisation de 10 à 15 % de poussières de pierre calcaire en remplacement cimentaire diminue la résistance à la flexion des mélanges de BCR et de BCP de 10 à 25 % à 7 et 28 jours. Les résistances à la flexion des bétons contenant ces poussières se développent peu ou pas entre 7 et 28 jours de cure.

Bétons moulés à sec en usine

- Les blocs fabriqués avec 10 et 15 % de poudre de verre ont des résistances à la compression similaires au mélange de référence. Les blocs contenant 10 à 30 % de poudre de verre ont tous atteint une résistance minimale à la compression de 15 MPa après 14 jours;
- L'utilisation de 15 à 30 % de poudre de verre permet d'obtenir des pavés ayant des résistances à la compression minimales de 50 MPa à un âge de 28 jours;
- L'utilisation de 15, 20 et 25 % de poudre de verre dans les pavés permet d'obtenir des résistances à l'écaillage acceptables. Un taux de remplacement de 20 % semble optimal pour obtenir une bonne durabilité aux cycles de gel-dégel.

Bétons moulés à sec en laboratoire

- Le temps, le squelette granulaire et les ajouts minéraux influencent la maniabilité du béton moulé à sec;
- La poudre de verre a peu d'influence sur la maniabilité des mélanges de béton moulés à sec fabriqués en laboratoire;
- Pour des taux de remplacement de 15 à 30 %, la poudre de verre diminue de 15 % la résistance à la compression du béton à un âge de 28 jours et de 20 à 30 % la résistance à la traction;
- Les poussières de pierre calcaire ont peu d'influence sur la maniabilité du béton frais;
- L'utilisation de poussières de pierre calcaire en remplacement de 10 et 15 % du ciment et d'une partie du sable diminue de 15 % la résistance à la compression du béton à 28 jours;
- Les poussières de béton concassé diminuent la maniabilité du béton;
- L'utilisation de poussières de béton concassé en remplacement de 10 et 15 % du ciment et d'une partie du sable diminue de 10 à 20 % la résistance à la compression du béton à 28 jours.

Le présent projet de recherche a permis de mettre en perspective le potentiel d'utilisation de matériaux alternatifs en ajout cimentaire dans les bétons secs. L'utilisation de poudre de verre semble prometteuse dans les bétons compactés au rouleau (BCR et BCP) et tout particulièrement dans les produits de béton moulés à sec. Les résultats obtenus lors des essais en usine montrent sans aucun doute le potentiel de la poudre de verre à être utilisée comme ajout cimentaire dans les éléments de béton moulé à sec. La capacité de la poudre de verre à diminuer la pénétration des ions chlore démontre que cet ajout cimentaire permet d'obtenir un

béton durable. La fabrication d'un béton utilisant une quantité inférieure de ciment et présentant une durabilité égale ou supérieure aux bétons traditionnels est sans contredit un avantage majeur au point de vue environnemental. Pour faire suite à ces travaux, il serait intéressant d'étudier la durabilité aux cycles de gel-dégel des BCR et des BCP avec poudre de verre.

L'utilisation de poussières de concassage en remplacement cimentaire dans les bétons secs a donné des résultats mitigés. L'hypothèse initiale était que ces poussières pourraient remplacer une partie du ciment non hydraté dans le béton et permettraient d'obtenir des propriétés mécaniques similaires. Les essais réalisés en laboratoire ont démontré que le remplacement de 10 à 15 % du ciment par ces poussières abaisse systématiquement les résistances mécaniques du béton. Ces résultats n'écartent toutefois pas le potentiel d'utilisation de ces matériaux dans le béton. De faibles taux de remplacement du ciment par ces poussières ont peu d'impact sur les propriétés mécaniques du béton. L'utilisation des poussières de concassage en remplacement partiel du sable permettrait aux producteurs de béton de diminuer les coûts de production et d'utiliser un matériau peu valorisé dans le domaine de la construction.

Somme toute, ce projet de recherche a permis d'élargir les connaissances sur les BCR, les BCP et les bétons moulés à sec, lorsque fabriqués avec des ajouts cimentaires alternatifs. Par la réalisation de ces travaux, je suis fier de contribuer aux connaissances scientifiques dans le domaine du béton. Je souhaite que mes travaux permettent à l'industrie du béton d'utiliser de nouveaux matériaux pour fabriquer des produits durables tout en ayant un impact minimal sur l'environnement. La mise en application de ces connaissances serait un pas de plus dans la direction du développement durable.

LISTE DES RÉFÉRENCES

- Aïtcin, P. (2001). *Bétons haute performance*. Eyrolles, Paris, 683 p.
- American Concrete Institute (1987). *Roller compacted concrete pavement*. American Concrete Institute, Detroit, 55 p.
- Association Canadienne du Ciment (2010). Industrie du ciment du Canada : Construire un avenir durable. <http://www.cement.ca/fr/Relever-le-defi-des-changements-climatiques-et-de-la-qualite-de-l-air.html>, page consultée le 3 juillet 2011.
- ASTM C 39/C 39M – 03, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, *Annual book of ASTM standards*, vol. 04.01, ASTM International, West Conshohocken, PA, 5 p.
- ASTM C 78 – 02, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading), *Annual book of ASTM standards*, vol. 04.01, ASTM International, West Conshohocken, PA, 3 p.
- ASTM C 138/C 138M – 01a, Standard Test Method for Density, Yield, and Air Content of Concrete, *Annual book of ASTM standards*, vol. 04.01, ASTM International, West Conshohocken, PA, 3 p.
- ASTM C 140 – 03, Standard Test Method for Sampling and Testing Concrete Masonry Units and Related Units, *Annual book of ASTM standards*, vol. 04.01, ASTM International, West Conshohocken, PA, 10 p.
- ASTM C 192/C 192M – 02, Standard Test Method for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, *Annual book of ASTM standards*, vol. 04.01, ASTM International, West Conshohocken, PA, 8 p.
- ASTM C 231 – 04, Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Presure Method, *Annual book of ASTM standards*, vol. 04.01, ASTM International, West Conshohocken, PA, 9 p.
- ASTM C 496/C 496M – 04, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, *Annual book of ASTM standards*, vol. 04.01, ASTM International, West Conshohocken, PA, 5 p.
- ASTM C 617 – 98, Standard Test Method for Capping Cylindrical Concrete Specimens, *Annual book of ASTM standards*, vol. 04.01, ASTM International, West Conshohocken, PA, 5 p.
- ASTM C 1170 – 91, Standard Test Method for Determining Consistency and Density of Roller-Compacted Concrete Using a Vibrating Table, *Annual book of ASTM standards*, vol. 04.01, ASTM International, West Conshohocken, PA, 5 p.
- ASTM C 1202 – 97, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, *Annual book of ASTM standards*, vol. 04.01, ASTM International, West Conshohocken, PA, 6 p.

- ASTM C 1435/C 1435M – 08, Standard Test Method for Molding Roller-Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Hammer, *Annual book of ASTM standards*, vol. 04.02, ASTM International, West Conshohocken, PA, 5 p.
- BCR.cc (2011). Béton compacté au rouleau. <http://bcr.cc/pages/accueil.html> page consultée le 11 avril 2011.
- Boisvert, J., Marchand, J., Pigeon, M. et Isabelle, H. L. (1992). Durabilité au gel-dégel et résistance à l'écaillage des pavés de béton. *Canadian Journal of Civil Engineering*, volume 19, numéro 6, p. 1017-1024.
- Cao, C., Sun, W. et Qin, H. (2000). Analysis on strength and fly ash effect of roller-compacted concrete with high volume fly ash. *Cement and Concrete Research*, volume 30, numéro 1, p. 71-75.
- Chidiac, S. E. et Zibara, H. (2007). Dry-cast concrete masonry products: properties and durability. *Canadian Journal of Civil Engineering*, volume 34, numéro 11, p. 1413-23.
- CSA (2009). *A231.1-06/A231.2-06 (R2010) - Precast Concrete Paving Slabs/Precast Concrete Pavers*, Toronto, Ontario. : Associations canadienne de normalisation, 12 p.
- CSA (2004). *A165.1-04 – Éléments de maçonnerie en bloc de béton*, Associations canadienne de normalisation, Mississauga, Ontario, p. 3-21
- Gagné, L. (avril 2010). Le verre - fiches informatives. <http://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/Upload/Publications/Fiche-verre.pdf> page consultée le 27 septembre 2011.
- Gauthier, P., Marchand, J. (2002). *Conception et réalisation de revêtements en béton compacté au rouleau au Québec*, Association des constructeurs de routes et grands travaux du Québec, 119 p.
- Hazaree, C., Ceylan, H. et Wang, K. (2011). Influences of mixture composition on properties and freeze-thaw resistance of RCC. *Construction and Building Materials*, volume 25, numéro 1, p. 313-319.
- Houehanou, E. C. (2004). *Étude De L'influence De L'entraînement De L'air Sur La Maniabilité Et La Résistance à La Compression Des Bétons Compactés Au Rouleau*. Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Département de génie civil, Sherbrooke, Qc, 128 p.
- Idir, R., Cyr, M. et Tagnit-Hamou, A. (2010). Use of fine glass as ASR inhibitor in glass aggregate mortars. *Construction & Building Materials*, volume 24, numéro 7, p. 1309-12.
- Jain, J. A. et Neithalath, N. (2010). Chloride transport in fly ash and glass powder modified concretes - Influence of test methods on microstructure. *Cement and Concrete Composites*, volume 32, numéro 2, p. 148-56.
- Juvas, K. J. (1990). *Rheology of fresh cement and concrete : proceedings of the International Conference organized by the British Society of Rheology*. University of Liverpool, Liverpool, UK, 373 p.

- Käppi, A. et Nordenswan, E. (2007). Workability of No-Slump Concrete. *Concrete International*, numéro 01624075, p. 37-37-41.
- Lee, G., Ling, T., Wong, Y. et Poon, C. (2011). Effects of crushed glass cullet sizes, casting methods and pozzolanic materials on ASR of concrete blocks. *Construction and Building Materials*, volume 25, numéro 5, p. 2611-2618.
- Marchand, J., Gagné, R., Ouellet, E. et Lepage, S. (1997). Mixture Proportioning of Roller Compacted Concrete - A Review. *Concrete Technology Special Publication SP-171-22*, p. 457-487.
- Marchand, J., Hornain, H., Diamond, S., Pigeon, M. et Guiraud, H. (1996). The microstructure of dry concrete products. *Cement and Concrete Research*, volume 26, numéro 3, p. 427-438.
- NT BUILT 427 (1994), Compactibility with IC-Tester, *Nordtest Method*, Nordtest, Espoo, Finland, 4 p.
- Pigeon, M. et Malhotra, V. M. (1995). Frost resistance of roller-compacted high-volume fly ash concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, volume 7, numéro 4, p. 208-211.
- Shao, Y., Lefort, T., Moras, S. et Rodriguez, D. (2000). Studies on concrete containing ground waste glass. *Cement and Concrete Research*, volume 30, numéro 1, p. 91-100.
- Shayan, A. et Xu, A. (2006). Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs. *Cement and Concrete Research*, volume 36, numéro 3, p. 457-468.
- Shi, C., Wu, Y., Riefler, C. et Wang, H. (2005). Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders. *Cement and Concrete Research*, volume 35, numéro 5, p. 987-993.
- Shi, C. et Zheng, K. (2007). A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, volume 52, numéro 2, p. 234-247.
- Tagnit-Hamou, A. (1995). *Microstructure et physico-chimie des ciments et des bétons*, Notes de cours GCI 712, Département de génie civil édition. Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 289 p.
- Turgut, P. (2008). Properties of masonry blocks produced with waste limestone sawdust and glass powder. *Construction and Building Materials*, volume 22, numéro 7, p. 1422-1427.
- Vahedifard, F., Nili, M. et Meehan, C. L. (2010). Assessing the effects of supplementary cementitious materials on the performance of low-cement roller compacted concrete pavement. *Construction and Building Materials*, volume 24, numéro 12, p. 2528-2535.
- Wang, Z., Shi, C. et Song, J. (2009). Effect of glass powder on chloride ion transport and alkali-aggregate reaction expansion of lightweight aggregate concrete. *Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition*, volume 24, numéro 2, p. 312-317.

ANNEXE A

Résistance à la compression des BCR et des BCP

Tableau A.1 – Résistance à la compression des BCR avec poudre de verre

Mélange	7 jours		28 jours		91 jours	
	f _c	s	f _c	s	f _c	s
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
32REFGU	38,8	2,0	43,2	1,2	48,3	3,4
32REFSF	38,5	2,0	43,8	2,4	46,2	3,5
32PV10	38,3	2,0	43,4	1,4	46,0	3,0
32PV15	37,5	4,2	40,8	3,2	53,8	1,1
32PV20	33,9	2,1	38,0	3,0	47,0	7,2
32PV25	28,8	1,1	34,3	3,9	45,2	1,4

Tableau A.2 – Résistance à la compression des BCR avec poussières de pierre calcaire

Mélange	7 jours		28 jours		91 jours	
	f _c	s	f _c	s	f _c	s
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
32REFGU	38,8	2,0	43,2	1,2	48,3	3,4
32REFSF	38,5	2,0	43,8	2,4	46,2	3,5
32PPC10	39,0	1,2	40,7	4,4	44,9	4,1
32PPC15	36,2	1,4	39,8	2,2	45,8	3,5

Tableau A.3 – Résistance à la compression des BCR avec poussières de béton concassé

Mélange	7 jours		28 jours		91 jours	
	f _c	s	f _c	s	f _c	s
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
32REFGU	38,8	2,0	43,2	1,2	48,3	3,4
32REFSF	38,5	2,0	43,8	2,4	46,2	3,5
32PBC10	35,1	1,5	42,7	0,5	45,2	4,1
32PBC15	31,6	1,5	34,6	1,9	42,4	2,8

Tableau A.4 – Résistance à la compression des BCP avec poudre de verre

Mélange	7 jours		28 jours		91 jours	
	f _c	s	f _c	s	f _c	s
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
37REFGU	38,7	1,4	46,3	1,7	55,5	0,8
37REFSF	42,4	1,0	48,5	4,2	56,3	2,7
37PV10	39,0	2,4	46,5	2,7	55,2	0,8
37PV15	37,8	0,3	46,8	1,5	57,7	0,1
37PV20	35,7	1,5	45,5	2,1	54,2	4,0
37PV25	35,8	1,0	42,1	0,9	51,8	2,1

Tableau A.5 – Résistance à la compression des BCP avec poussières de pierre calcaire

Mélange	7 jours		28 jours		91 jours	
	f _c	s	f _c	s	f _c	s
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
37REFGU	38,7	1,4	46,3	1,7	55,5	0,8
37REFSF	42,4	1,0	48,5	4,2	56,3	2,7
37PPC10	35,0	1,3	41,1	1,4	46,7	3,4
37PPC15	29,5	0,8	35,9	1,2	39,1	4,8

Tableau A.6 – Résistance à la compression des BCR avec poussières de béton concassé

Mélange	7 jours		28 jours		91 jours	
	f _c	s	f _c	s	f _c	s
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
37REFGU	38,7	1,4	46,3	1,7	55,5	0,8
37REFSF	42,4	1,0	48,5	4,2	56,3	2,7
37PBC10	32,6	4,5	44,2	0,6	48,9	2,0
37PBC15	34,4	0,5	43,2	2,4	45,1	1,0

ANNEXE B

Résistance à la flexion des BCR et des BCP

Tableau B.1 – Résistance à la flexion des BCR avec poudre de verre

Mélange	7 jours		28 jours	
	Mr	s	Mr	s
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
32REFGU	5,9	0,1	7,3	0,3
32REFSF	5,3	0,1	7,0	0,8
32PV10	5,5	0,2	6,5	0,1
32PV15	5,5	0,4	5,7	0,3
32PV20	5,0	0,1	5,8	0,1
32PV25	4,4	0,4	5,9	0,8

Tableau B.2 – Résistance à la flexion des BCR avec poussières de pierre calcaire

Mélange	7 jours		28 jours	
	Mr	s	Mr	s
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
32REFGU	5,9	0,1	7,3	0,3
32REFSF	5,3	0,1	7,0	0,8
32PPC10	5,8	5,8	5,8	0,3
32PPC15	5,6	5,6	5,6	0,1

Tableau B.3 – Résistance à la flexion des BCR avec poussières de béton concassé

Mélange	7 jours		28 jours	
	Mr	s	Mr	s
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
32REFGU	5,9	0,1	7,3	0,3
32REFSF	5,3	0,1	7,0	0,8
32PBC10	5,4	5,4	5,5	0,0
32PBC15	4,8	4,8	5,5	0,5

Tableau B.4 – Résistance à la flexion des BCP avec poudre de verre

Mélange	7 jours		28 jours	
	Mr (MPa)	s (MPa)	Mr (MPa)	s (MPa)
37REFGU	6,7	0,1	6,7	0,5
37REFSF	6,7	0,0	7,6	0,3
37PV10	5,5	0,3	6,5	0,3
37PV15	5,6	0,4	6,5	0,1
37PV20	5,4	0,2	6,4	0,4
37PV25	5,2	0,4	6,3	0,3

Tableau B.5 – Résistance à la flexion des BCP avec poussières de pierre calcaire

Mélange	7 jours		28 jours	
	Mr (MPa)	s (MPa)	Mr (MPa)	s (MPa)
37REFGU	6,7	0,1	6,7	0,5
37REFSF	6,7	0,0	7,6	0,3
37PPC10	5,0	0,3	5,8	0,0
37PPC15	5,0	0,1	5,4	0,0

Tableau B.6 – Résistance à la flexion des BCR avec poussières de béton concassé

Mélange	7 jours		28 jours	
	Mr (MPa)	s (MPa)	Mr (MPa)	s (MPa)
37REFGU	6,7	0,1	6,7	0,5
37REFSF	6,7	0,0	7,6	0,3
37PBC10	5,1	0,3	5,8	0,2
37PBC15	5,1	0,4	5,5	0,6

ANNEXE C

Pénétration des ions chlore dans les BCP

Tableau C.1 – Pénétration des ions chlore dans les BCP (Coulombs)

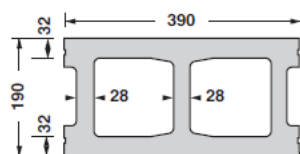
Mélange		28 jours			56 jours			91 jours		
		Charge	Moy.	s	Charge	Moy.	s	Charge	Moy.	s
37REFGU	Haut	1675	1681	152	1567	1517	44	1445	1277	154
	Centre	1836			1485			1143		
	Bas	1533			1500			1242		
37REFSF	Haut	354	360	8	293	258	31	238	227	14
	Centre	357			240			232		
	Bas	369			241			212		
37PV15	Haut	2062	1904	138	1090	1015	65	481	476	53
	Centre	1838			986			526		
	Bas	1812			970			420		
37PV25	Haut	1194	1185	15	694	550	129	257	278	42
	Centre	1193			511			250		
	Bas	1167			446			326		

ANNEXE D

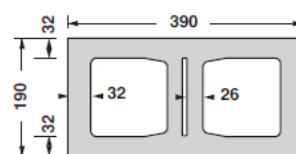
Essais réalisés sur les blocs de maçonnerie

Tableau D.1 – Absorption et masse volumique des blocs de maçonnerie

Échantillon	Type	Absorption (kg/m ³)	Absorption (%)	m.v. (kg/m ³)	Volume net (mm ³)	Aire nette (mm ²)	Aire brute (mm ²)
REF	I	141	6,56	2 155	7 571 300	39 744	74 102
	II	148	6,97	2 126	8 298 700	43 563	74 100
moyenne		145	6,77	2 141	-	-	-
10V	I	141	6,60	2 142	7 533 500	39 702	74 100
	II	145	6,72	2 154	8 318 500	43 552	73 910
moyenne		143	6,66	2 148	-	-	-
15V	I	145	6,70	2 158	7 683 300	40 017	74 198
	II	147	6,81	2 153	8 392 600	43 485	73 910
moyenne		146	6,76	2 156	-	-	-
20V	I	144	6,64	2 172	7 901 400	40 993	74 299
	II	147	6,89	2 136	8 395 800	43 502	73 521
moyenne		146	6,76	2 154	-	-	-
25V	I	146	6,78	2 156	7 584 500	40 130	74 105
	II	151	7,06	2 135	8 282 300	43 706	73 910
moyenne		149	6,92	2 145	-	-	-
30V	I	148	6,94	2 135	7 624 700	39 920	74 295
	II	151	7,09	2 129	8 261 600	43 597	74 005
moyenne		149	7,01	2132	-	-	-



Type I

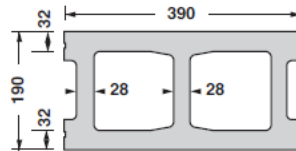


Type II

Tableau D.2 – Résistance à la compression des blocs de maçonnerie

Mélange	Contrainte (MPa)									
	3 j.		7 j.		14 j.		28 j.		56 j.	
	(An)	(Ag)	(An)	(Ag)	(An)	(Ag)	(An)	(Ag)	(An)	(Ag)
REF	11,65	6,39	16,41	9,00	19,80	10,86	21,66	11,89	21,54*	12,52*
	11,16	6,12	15,43	8,46	19,01*	11,04*	22,75	12,49	21,85*	12,70*
	11,10	6,09	15,75	8,64	18,39*	10,68*	22,32	12,25	23,14*	13,45*
moyenne	11,30	6,20	15,86	8,70	19,07	10,86	22,24	12,21	22,18	12,89
10V	13,24	7,26	15,86	8,70	19,31	10,59	22,21	12,19	23,25*	13,51*
	13,46	7,38	16,08	8,82	18,44*	10,71*	22,54	12,37	25,16*	14,62*
	13,78	7,56	15,75	8,64	19,11*	11,10*	22,65	12,43	24,85*	14,44*
moyenne	13,49	7,40	15,90	8,72	18,96	10,80	22,46	12,33	24,42	14,19
15V	12,03	6,60	15,43	8,46	19,36	10,62	21,55	11,83	23,25*	13,51*
	11,76	6,45	14,36*	8,34*	19,01*	11,04*	21,00	11,53	23,25*	13,51*
	12,20	6,69	14,67*	8,52*	18,80*	10,92*	21,44	11,77	19,89*	11,56*
moyenne	12,00	6,58	14,82	8,44	19,06	10,86	21,33	11,71	22,13	12,86
20V	10,54*	6,12*	15,21	8,34	18,82	10,32	20,79	11,41	20,66*	12,01*
	10,89	5,97	14,46*	8,40*	17,36*	10,08*	21,22	11,65	22,32*	12,97*
	10,78	5,91	14,81	8,13	18,18*	10,56*	21,33	11,71	21,34*	12,40*
moyenne	10,73	6,00	14,83	8,29	18,12	10,32	21,11	11,59	21,44	12,46
25V	10,50	5,76	13,62	7,47	18,27	10,02	19,91	10,92	20,41*	11,86*
	10,72	5,88	13,12*	7,62*	17,83	9,78	20,46	11,23	18,70*	10,86*
	10,89	5,97	13,95	7,65	17,00*	9,87*	20,02	10,98	21,44	11,77
moyenne	10,70	5,87	13,56	7,58	17,70	9,89	20,13	11,04	20,18	11,50
30V	10,23	5,61	13,24	7,26	15,97	8,76	18,27	10,02	19,37*	11,26*
	10,06	5,52	13,51	7,41	15,29*	8,88*	19,04	10,44	18,80*	10,92*
	10,94	6,00	13,35	7,32	14,98*	8,70*	18,82	10,32	17,82*	10,35*
moyenne	10,41	5,71	13,36	7,33	15,42	8,78	18,71	10,26	18,67	10,84

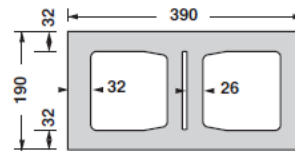
* bloc de type II



Type I

$$A_n = 40\,660 \text{ mm}^2$$

$$A_g = 74\,100 \text{ mm}^2$$



Type II

$$A_n = 43\,050 \text{ mm}^2$$

$$A_g = 74\,100 \text{ mm}^2$$

ANNEXE E

Essais réalisés sur les pavés

Tableau E.1 – Absorption et masse volumique des pavés *

Échantillon	n°	Absorption (kg/m³)	Absorption (%)	Masse volumique (kg/m³)
REF	I	105	4,56	2 299
	II	84	3,57	2 360
	III	92	3,91	2 348
moyenne		94	4,02	2 336
15V	I	99	4,32	2 283
	II	77	3,26	2 357
	III	76	3,21	2 358
moyenne		84	3,59	2 333
20V	I	89	3,83	2 321
	II	84	3,61	2 325
	III	90	3,91	2 294
moyenne		88	3,78	2 313
25V	I	101	4,46	2 275
	II	103	4,52	2 274
	III	102	4,49	2 282
moyenne		102	4,49	2 277
30V	I	102	4,48	2 286
	II	100	4,34	2 293
	III	75	3,22	2 322
moyenne		92	4,01	2 300

* Essais réalisés sur des pavés coupés en deux

Tableau E.2 – Résistance à la compression des pavés à 28 jours

Nom	Numéro		Largeur (mm)	Longueur (mm)	Hauteur (mm)	Charge (N)	f _c (MPa)	f _c moyen (MPa)	s (MPa)
REF	•	1	81,0	81,0	78,5	315 910	48,1	51,0	8,0
	•	2	81,0	80,0	80,0	389 170	60,1		
	••	3	81,0	82,5	80,0	396 210	59,3		
	••	4	80,5	80,0	79,0	347 920	54,0		
	•••	5	80,5	82,0	79,5	285 730	43,3		
	•••	6	80,5	81,0	79,0	270 200	41,4		
15V	•	1	81,5	83,0	80,0	372 190	55,0	55,0	3,1
	•	2	81,5	80,0	79,0	350 940	53,8		
	••	3	82,5	81,5	79,0	342 390	50,9		
	••	4	81,0	80,0	79,0	346 730	53,5		
	•••	5	81,0	81,0	80,0	393 260	59,9		
	•••	6	80,5	80,5	78,0	368 360	56,8		
20V	•	1	82,0	81,5	79,0	342 140	51,2	51,2	4,3
	•	2	81,5	81,5	78,5	367 670	55,4		
	••	3	82,0	81,5	78,0	352 130	52,7		
	••	4	81,0	81,0	77,5	299 750	45,7		
	•••	5	80,5	81,5	77,5	366 720	55,9		
	•••	6	81,5	80,0	78,0	303 840	46,6		
25V	•	1	80,5	81,5	77,0	231 840	35,3	42,6	9,7
	•	2	80,0	80,5	76,0	203 610	31,6		
	••	3	81,0	81,0	78,0	312 900	47,7		
	••	4	81,5	81,5	77,5	235 990	35,5		
	•••	5	81,0	81,5	78,0	362 570	54,9		
	•••	6	82,0	81,5	79,0	339 050	50,7		
30V	•	1	80,0	78,0	78,0	333 650	53,5	52,9	5,1
	•	2	82,0	81,0	77,0	292 960	44,1		
	••	3	81,0	82,0	78,0	392 000	59,0		
	••	4	81,5	81,0	78,0	355 720	53,9		
	•••	5	81,0	81,0	77,0	367 410	56,0		
	•••	6	81,0	79,0	79,0	325 790	50,9		

< 45	< 50
------	------

Tableau E.3 – Résistance à la compression des pavés à 91 jours

Nom	Numéro		Largeur (mm)	Longueur (mm)	Hauteur (mm)	Charge (lb)	f _c (MPa)	f _c moyen (MPa)	s (MPa)
REF	•	1	82,0	82,5	79,0	116 000	76,3	79,0	1,6
	•	2	81,5	81,0	79,0	120 000	80,9		
	••	3	81,5	81,0	80,0	117 000	78,8		
	••	4	81,0	80,0	79,5	114 000	78,3		
	•••	5	81,5	81,0	79,0	119 000	80,2		
	•••	6	81,0	81,0	79,0	117 000	79,3		
15V	•	1	82,0	82,0	78,0	114 000	75,4	72,8	7,0
	•	2	81,0	80,0	79,0	108 000	74,1		
	••	3	81,0	82,0	80,0	102 000	68,3		
	••	4	80,0	80,0	79,5	88 000	61,2		
	•••	5	81,0	81,5	80,0	116 000	78,2		
	•••	6	80,5	81,0	78,0	117 000	79,8		
20V	•	1	82,0	82,0	78,0	109 000	72,1	72,2	3,8
	•	2	82,0	81,0	79,5	113 000	75,7		
	••	3	82,0	81,5	78,0	107 000	71,2		
	••	4	82,0	81,0	79,0	111 000	74,3		
	•••	5	82,0	80,0	78,0	96 000	65,1		
	•••	6	82,0	80,0	78,0	110 000	74,6		
25V	•	1	82,0	82,5	77,5	102 000	67,1	70,5	2,1
	•	2	81,5	81,0	78,0	105 000	70,7		
	••	3	81,0	81,0	78,0	107 000	72,5		
	••	4	82,5	81,5	79,0	105 000	69,5		
	•••	5	81,5	82,0	78,0	109 000	72,5		
	•••	6	82,0	82,0	79,0	107 000	70,8		
30V	•	1	80,5	78,0	79,0	109 000	77,2	66,1	6,4
	•	2	81,0	81,5	78,0	96 000	64,7		
	••	3	80,0	81,0	79,0	99 000	68,0		
	••	4	81,0	82,0	79,0	91 000	60,9		
	•••	5	81,0	81,5	78,0	99 000	66,7		
	•••	6	79,0	81,0	80,0	85 000	59,1		

Tableau E.4 – Écaillage des pavés

Nom	Numéro		Masse récipient (g)	Masse débris + récipient			Masse cumulée des débris		
				7 j. (g)	28 j. (g)	49 j. (g)	7 j. (g/m²)	28 j. (g/m²)	49 j. (g/m²)
REF	•	500	181,7	184,8	199,7	220,0	28,0	162,8	346,4
	••	501	185,2	186,7	200,1	211,1	13,6	134,8	234,3
	•••	502	185,5	186,5	197,9	208,4	9,0	112,2	207,1
	moy. : s :						16,9 9,9	136,6 25,4	262,6 73,8
15V	•	503	185,3	188,4	205,9	231,6	28,0	186,3	418,8
	••	504	185,2	200,9	256,6	305,3	142,0	645,8	1086,3
	•••	505	182,2	184,2	215,4	233,7	18,1	300,3	465,8
	moy. : s :						23,1 7,0	243,3 80,6	442,3 33,3
20V	•	506	185,2	187,9	201,1	214,6	24,4	143,8	265,9
	••	507	184,6	187,9	200,3	205,1	29,8	142,0	185,4
	•••	508	185,9	187,0	196,4	202,8	9,9	95,0	152,9
	moy. : s :						21,4 10,3	126,9 27,7	201,4 58,2
25	•	509	183,5	188,2	210,6	229,5	42,5	245,1	416,1
	••	510	181,8	185,1	217,9	230,5	29,8	326,5	440,5
	•••	511	185,2	186,1	204,6	224,5	8,1	175,5	355,5
	moy. : s :						26,8 17,4	249,0 75,6	404,0 43,8
30	•	512	185,1	192,1	230,7	253,7	63,3	412,4	620,5
	••	513	181,9	186,6	221,1	242,9	42,5	354,6	551,7
	•••	514	181,8	182,7	202,2	229,0	8,1	184,5	426,9
	moy. : s :						38,0 27,9	317,2 118,5	533,0 98,1

> 225	> 500
-------	-------

Aire totale pavés : 110 560 mm²
0,111 m²

ANNEXE F

Maniabilité des mélanges de béton moulé à sec au laboratoire

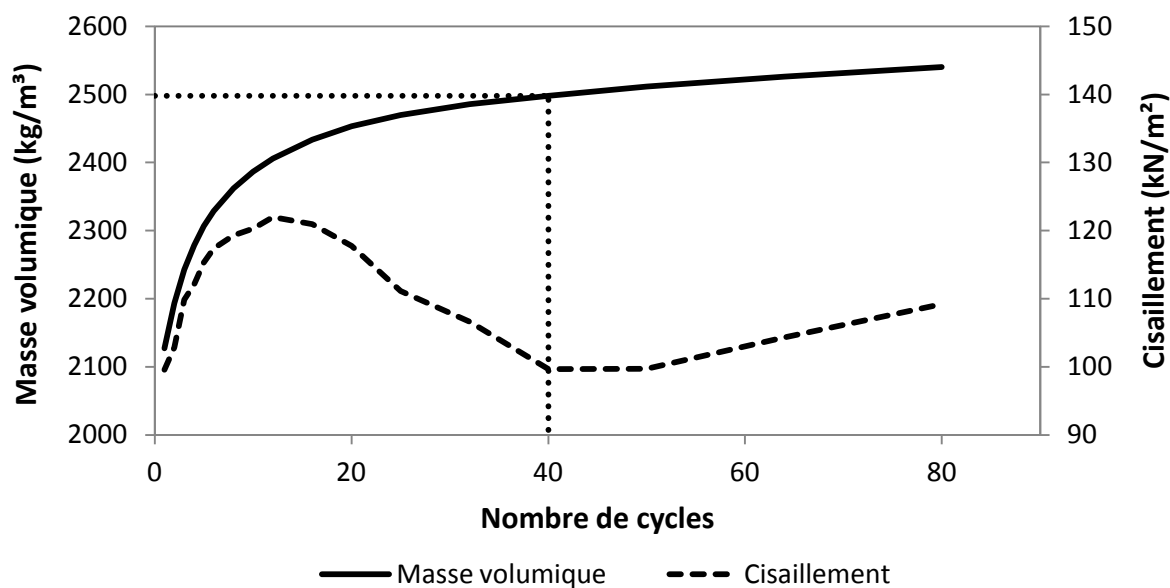


Figure F.1 – Masse volumique et cisaillement du mélange REF

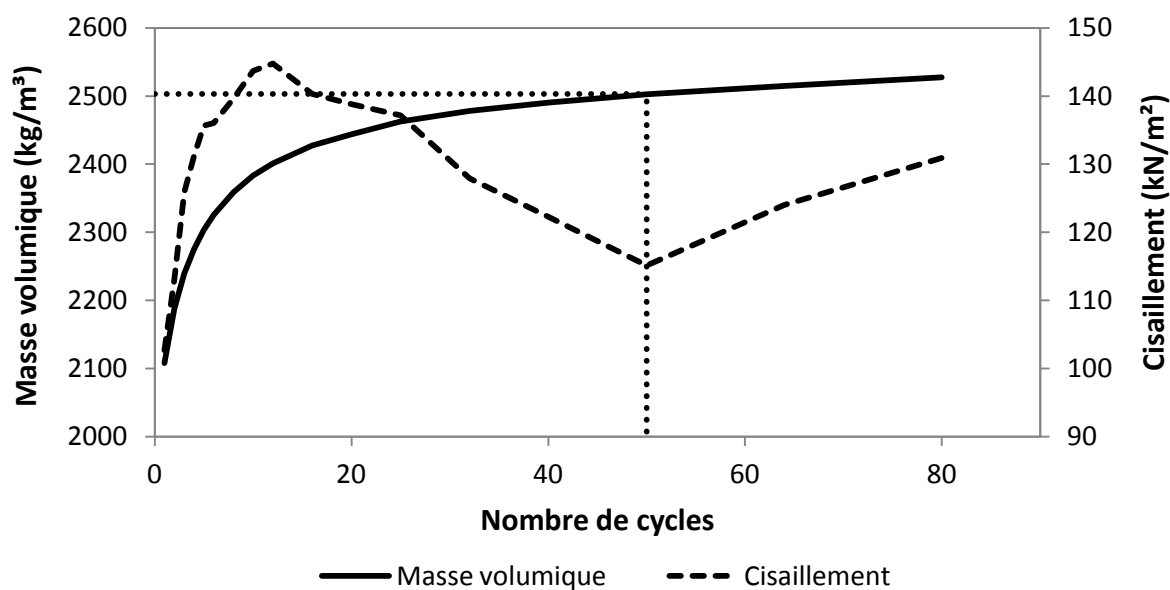


Figure F.2 – Masse volumique et cisaillement du mélange REFSF

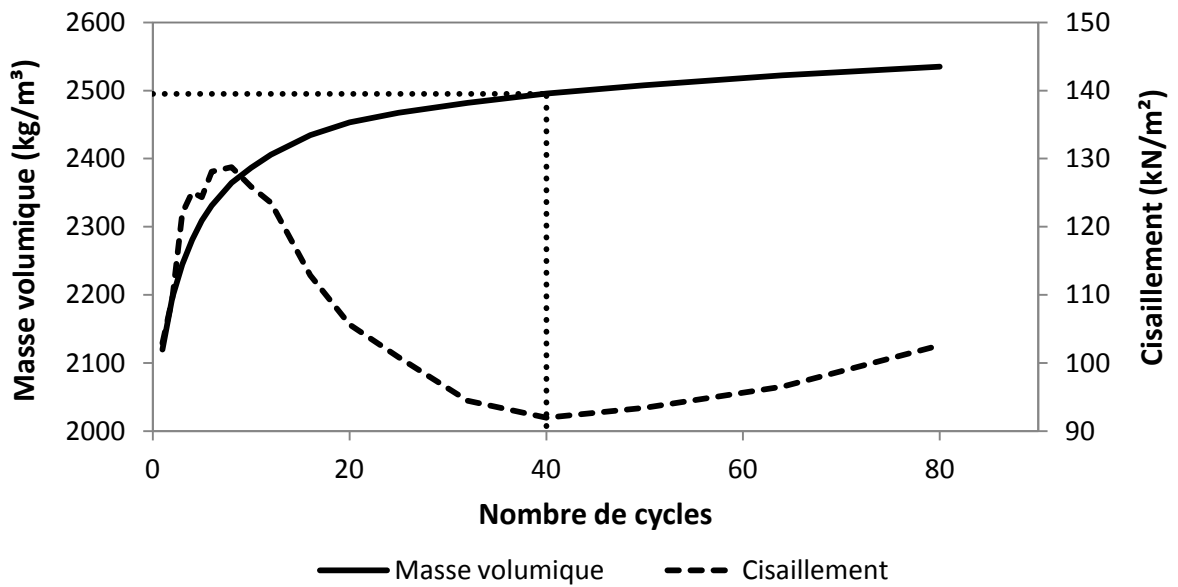


Figure F.3 – Masse volumique et cisaillement du mélange 15V

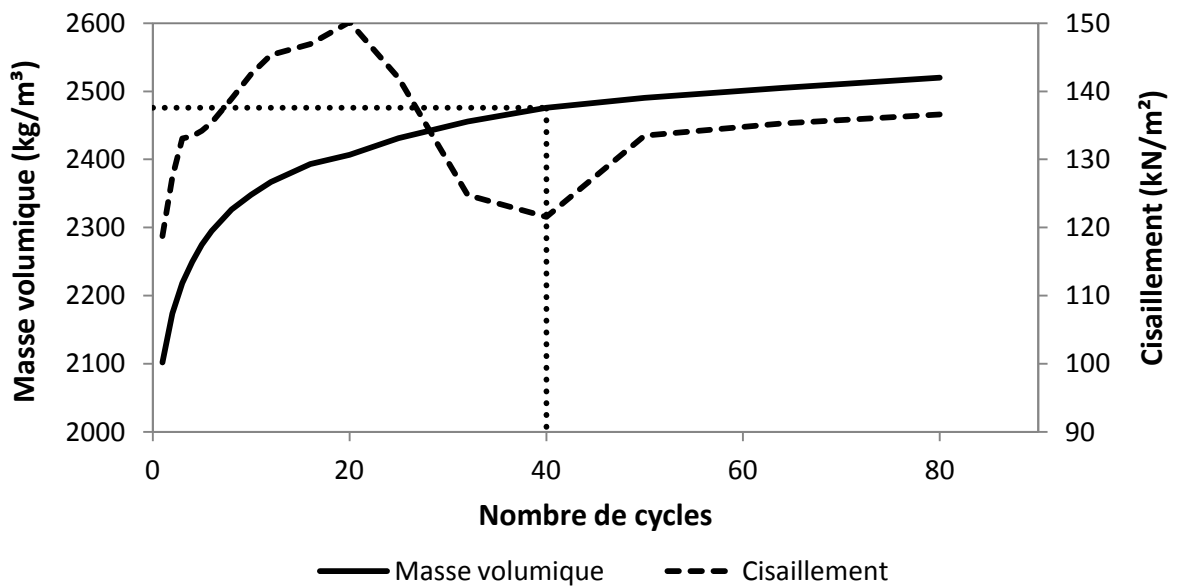


Figure F.4 – Masse volumique et cisaillement du mélange 20V

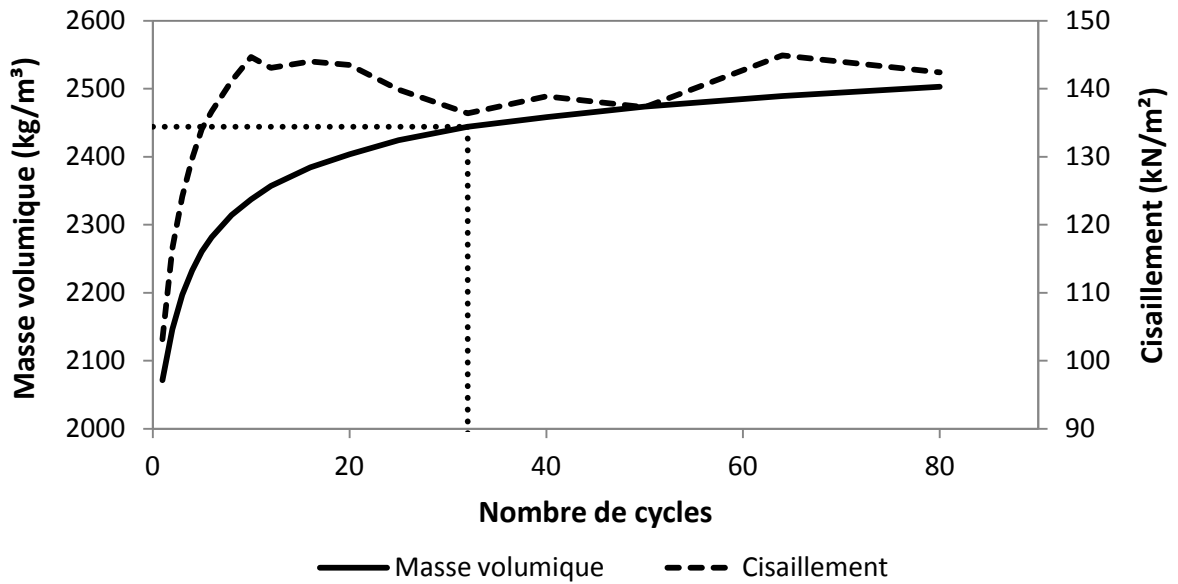


Figure F.5 – Masse volumique et cisaillement du mélange 25V

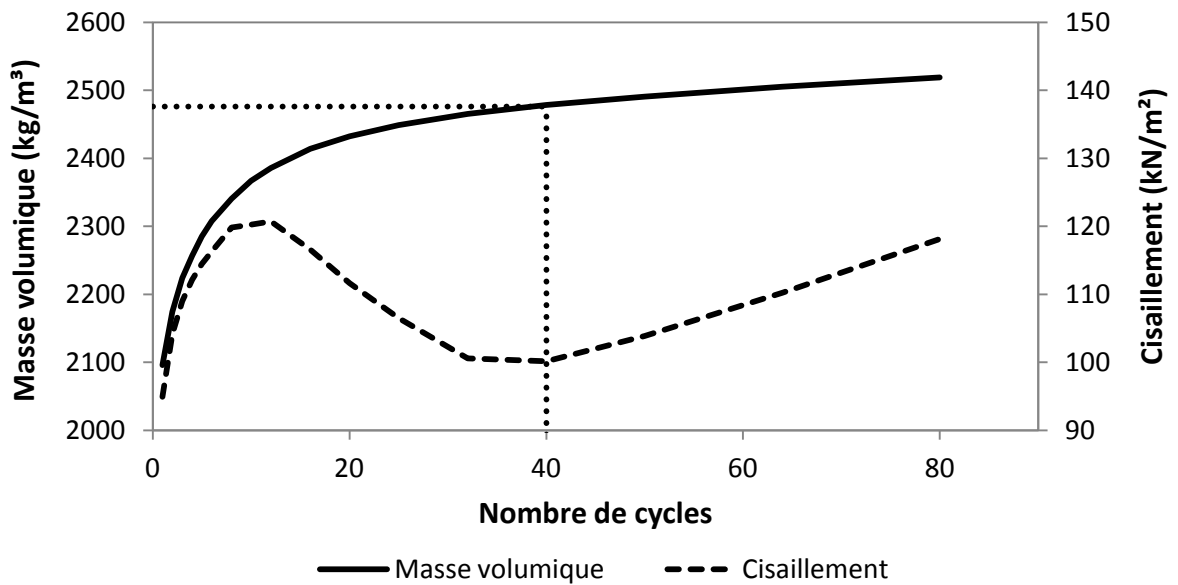


Figure F.6 – Masse volumique et cisaillement du mélange 30V

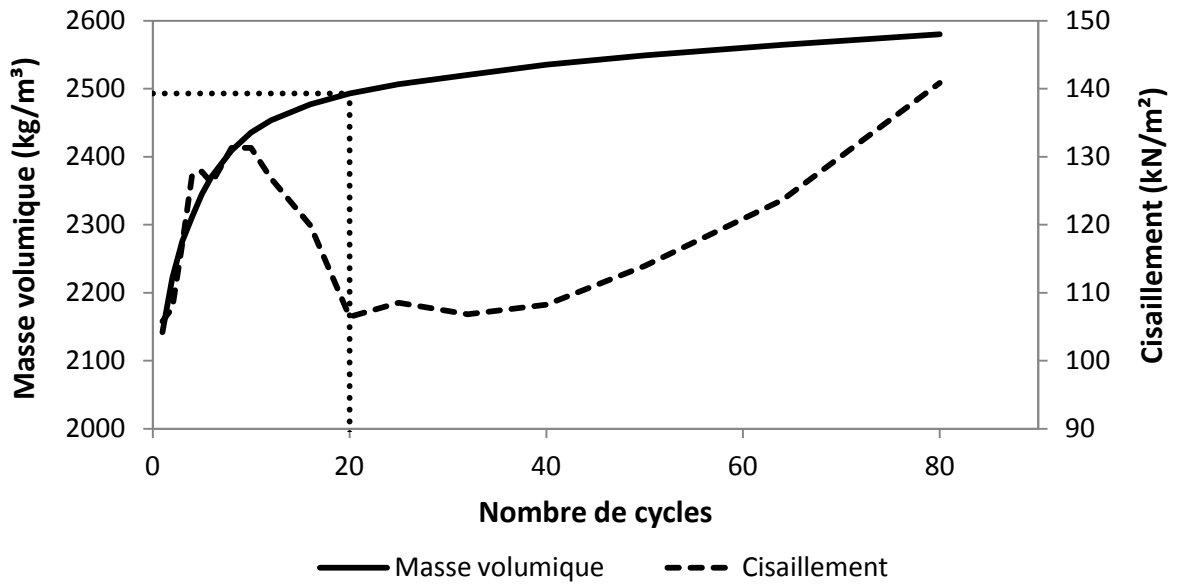


Figure F.7 – Masse volumique et cisaillement du mélange REF-2

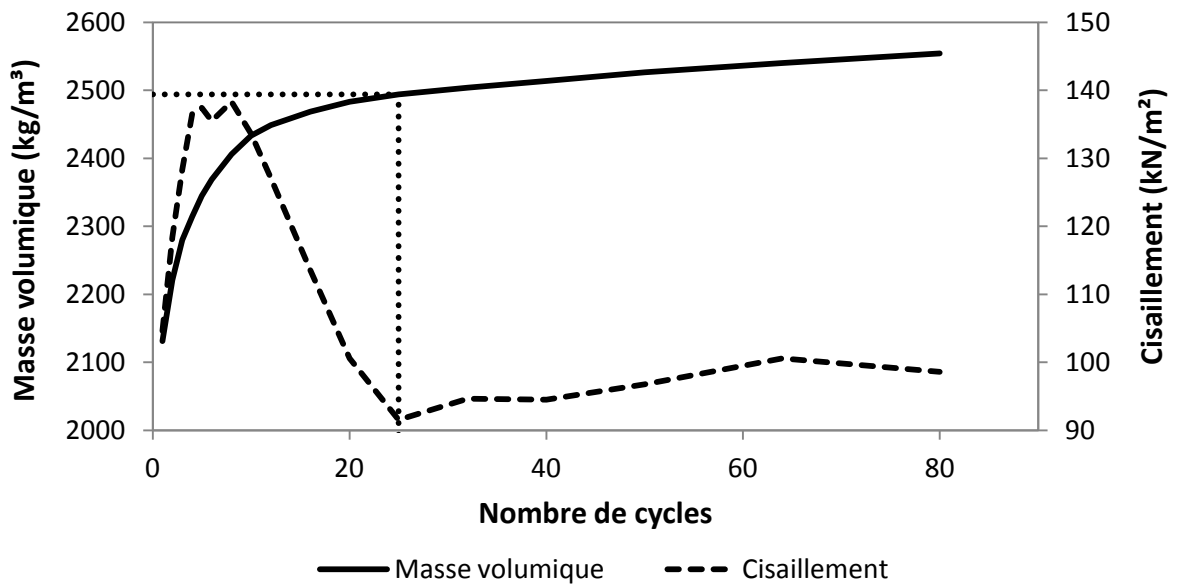


Figure F.8 – Masse volumique et cisaillement du mélange REF SF-2

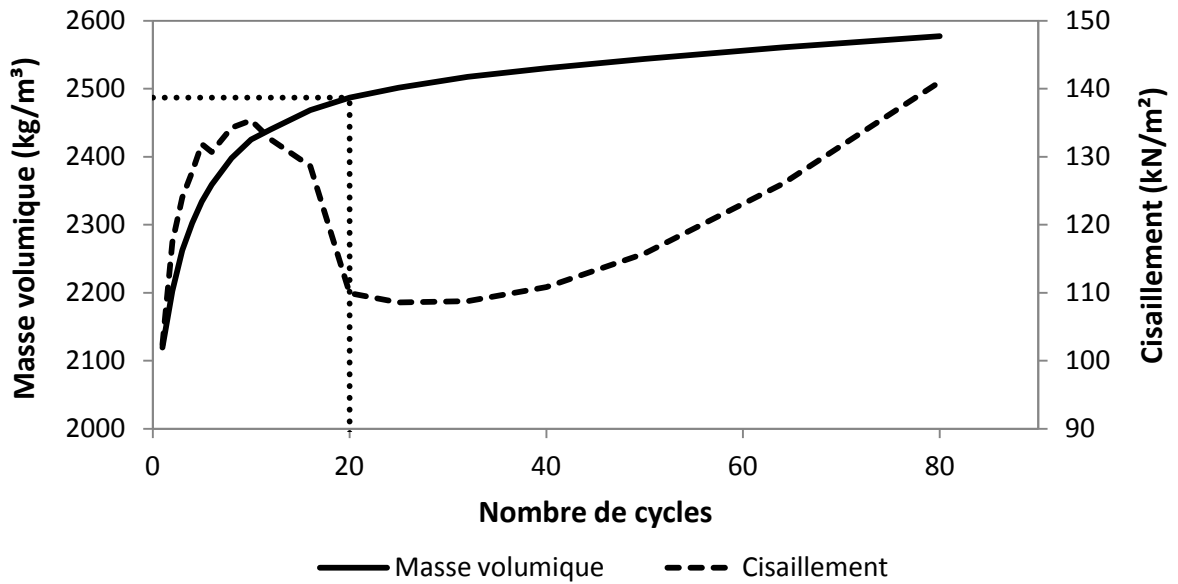


Figure F.9 – Masse volumique et cisaillement du mélange 10PPC

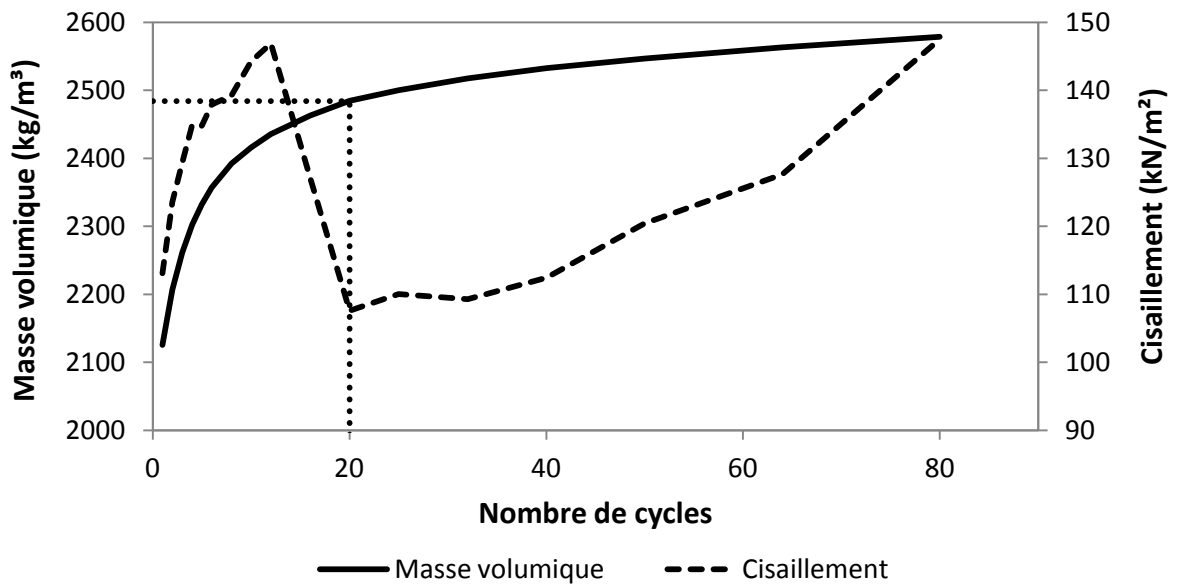


Figure F.10 – Masse volumique et cisaillement du mélange 15PPC

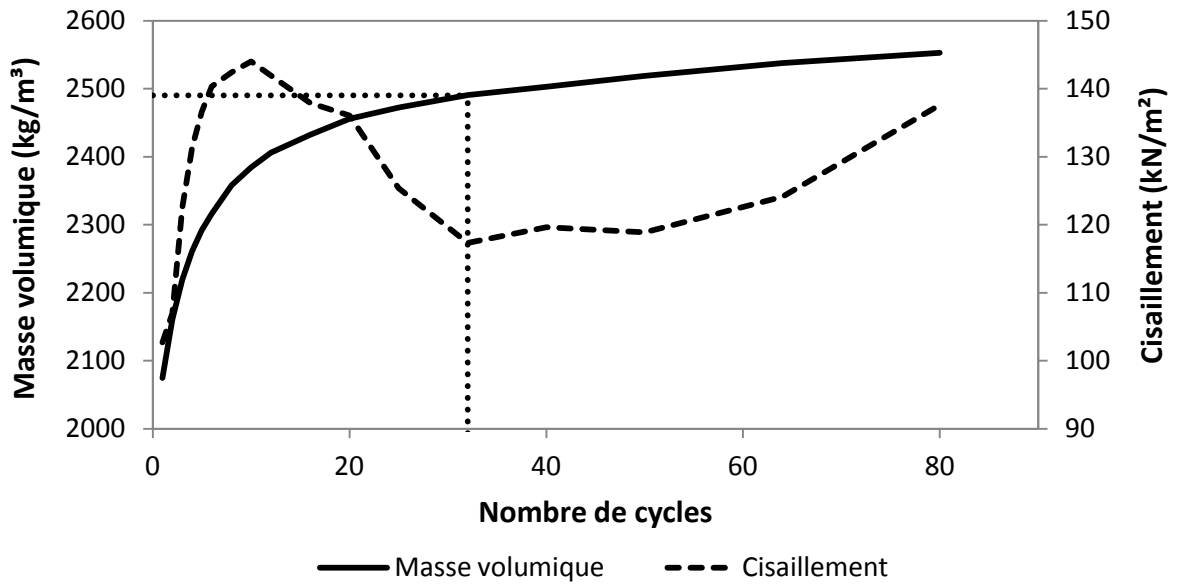


Figure F.11 – Masse volumique et cisaillement du mélange 10PBC

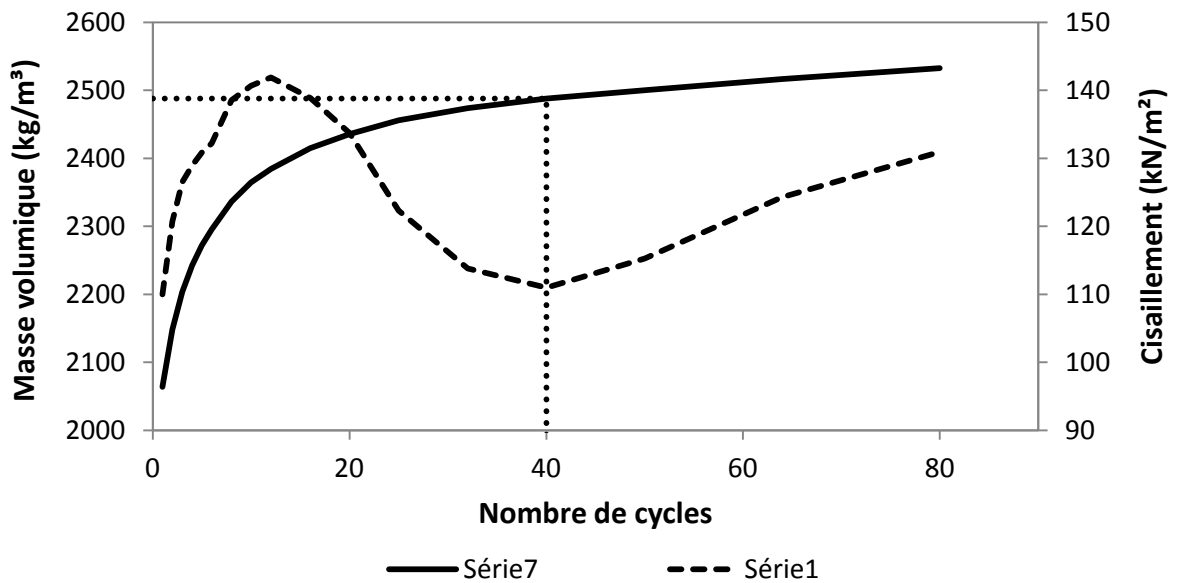


Figure F.12 – Masse volumique et cisaillement du mélange 15PBC

ANNEXE G

Masse volumique et absorption des bétons moulés à sec en laboratoire

Tableau G.1 – Masse volumique et absorption des bétons moulés à sec au laboratoire avec poudre de verre

Mélange	Absorption (kg/m³)	Absorption (%)	Masse volumique (kg/m³)
REF	55	2,26	2 450
	61	2,51	2 441
moyenne	58	2,38	2 446
REFSF	81	3,39	2 401
	-	-	-
moyenne	81	3,39	2 401
15V	79	3,32	2 397
	94	3,98	2 354
moyenne	87	3,65	2 375
20V	83	3,50	2 382
	92	3,89	2 352
moyenne	87	3,70	2 367
25V	105	4,50	2 338
	109	4,69	2 319
moyenne	107	4,59	2 329
30V	79	3,35	2 369
	86	3,66	2 343
moyenne	83	3,51	2 356

Tableau G.2 – Masse volumique et absorption des bétons moulés à sec au laboratoire avec poussières de pierre calcaire et poussières de béton concassé

Mélange	Absorption (kg/m ³)	Absorption (%)	Masse volumique (kg/m ³)
REF-2	73	3,00	2441
	75	3,10	2430
moyenne	74	3,05	2 435
REFSF-2	63	2,56	2441
	62	2,55	2433
moyenne	62	2,55	2 437
10PPC	84	3,47	2423
	83	3,42	2419
moyenne	83	3,45	2 421
15PPC	89	3,69	2418
	88	3,67	2407
moyenne	89	3,68	2 413
10PBC	101	4,21	2404
	103	4,27	2403
moyenne	102	4,24	2 403
15PBC	107	4,49	2388
	106	4,45	2387
moyenne	107	4,47	2 387

ANNEXE H

Résistance à la compression des bétons moulés à sec en laboratoire

Tableau H.1 – Résistance à la compression des bétons moulés à sec en laboratoire

Mélange	28 jours			91 jours		
	F'c (MPa)	F'c moyen (MPa)	s (MPa)	F'c (MPa)	F'c moyen (MPa)	s (MPa)
REF	71,2 71,4	71,3	0,2	79,0 72,0	75,5	4,9
REFSF	67,0 71,3	69,2	3,1	73,3 84,4	78,9	7,8
15V	66,7 56,1	61,4	7,5	53,3 63,9	58,6	7,5
20V	60,4 60,4	60,4	0,0	71,8 67,2	69,5	3,3
25V	64,6 58,7	61,7	4,2	66,1 64,1	65,1	1,4
30V	63,8 57,0	60,4	4,8	61,0 61,1	61,1	0,1
REF-2	82,0 71,7	76,9	7,2	86,9 78,5	82,7	5,9
REFSF-2	65,4 66,8	66,1	1,0	78,8 63,5	71,1	10,8
10PPC	71,1 61,8	66,4	6,5	60,3 68,3	64,3	5,6
15PPC	67,0 62,9	64,9	2,9	63,5 50,6	57,0	9,1
10PBC	71,3 64,9	68,1	4,5	65,9 67,3	66,6	1,0
15PBC	61,3 65,2	61,9	0,8	62,7 62,8	62,8	0,0

ANNEXE I

Résistance à la traction des bétons moulés à sec en laboratoire

Tableau I.1 – Résistance à la traction des bétons moulés à sec en laboratoire (28j.)

Mélange	T (MPa)	T moyen (MPa)	s (MPa)
REF	6,7 6,3	6,5	0,3
REFSF	5,9 5,7	5,8	0,2
15V	5,5 4,9	5,2	0,4
20V	5,6 4,8	5,2	0,6
25V	5,2 4,0	4,6	0,8
30V	5,2 4,5	4,8	0,5
REF-2	4,5 5,1	4,8	0,5
REFSF-2	3,1 3,7	3,4	0,4
10PPC	4,4 4,4	4,4	0,0
15PPC	3,7 3,7	3,7	0,0
10PBC	5,5 -	5,5	-
15PBC	5,7 -	5,7	-

